



**Luís Carlos da Silva
Coelho**

**Avaliação por Simulação da Comunicação entre
Veículos**



**Luís Carlos da Silva
Coelho**

**Avaliação por Simulação da Comunicação entre
Veículos.**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica da Dra. Susana Sargento, Professora auxiliar do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro, e do Dr. Victor Marques, Engenheiro da Portugal Telecom Inovação.

Dedico este trabalho aos meus Pais e Amigos pelo incansável apoio.

O júri

Presidente

Prof. Dr. José Carlos da Silva Neves

Professor Catedrático do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro

Prof. Dra. Ana Cristina Costa Aguiar

Professora Auxiliar Convidada do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (Arguente Principal)

Prof. Dra. Susana Isabel Barreto de Miranda Sargento

Professora Auxiliar do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro (Orientadora)

Agradecimentos

O trabalho desenvolvido ao longo deste ano lectivo contou, não só, com o meu esforço e empenho, no sentido de ampliar os meus conhecimentos para corresponder às expectativas geradas no início desta dissertação, mas também com a ajuda de algumas pessoas a quem devo um sincero agradecimento pelo apoio dispensado e pelos conhecimentos que me transmitiram.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer à Professora Susana Sargento, minha orientadora, pois foi ela quem me convidou para realizar esta dissertação tendo-se mostrado sempre disponível para me ajudar a traçar o caminho correcto para avançar no meu trabalho e cujos conhecimentos transmitidos foram indispensáveis no desenrolar de todo este processo.

Por outro lado, não poderia deixar passar em claro um agradecimento especial ao Gustavo Carneiro pois, mesmo sem estar minimamente envolvido na minha dissertação, foi peça chave para o início da minha aprendizagem sobre o NS-3 e foi uma pessoa que me deu conselhos úteis que me permitiram avançar no meu projecto, mostrando-se sempre disponível para responder às minhas questões. Os meus sinceros agradecimentos. Também os meus colaboradores André Cardote e André Reis merecem uma nota de agradecimento pois, apesar de durante grande parte do ano, estarem ocupados com o seu doutoramento nos Estados Unidos da América mostraram-se disponíveis para ajudar e dar a sua opinião no sentido de avançar no trabalho correctamente.

A nível pessoal, ser-me-ia impossível não referir os meus pais que foram peça chave nesta minha caminhada ao longo destes 5 anos. Estes, não só me permitiram tirar um curso superior, como ainda me prestaram todo o apoio, em qualquer momento, no sentido de me permitirem concentrar no trabalho árduo que foi preciso desenvolver, mas que se revelará um passo muito importante para o meu futuro.

Por fim, mas não menos importante, queria realçar os meus dois colegas Filipe Neves e Tomé Gomes, amigos de toda a vida, com os quais tive a felicidade de fazer este curso e de partilhar alguns momentos desta dissertação. Particularmente o Filipe Neves que foi a pessoa que me acompanhou durante todo o meu percurso escolar, cujo início foi há 18 anos atrás, nos bons momentos e não só. A eles um sincero obrigado por me terem ajudado, principalmente a ultrapassar as dificuldades iniciais e por me terem dado o impulso necessário para fazer este trabalho.

Palavras-chave

VANET, comunicação veículo-a-veículo, simulação, ns-3, redes veiculares, RSUs, OLSR, Ad hoc, Re-Healing Time, PDR, Atraso, número de saltos.

Resumo

Numa rede veicular, a densidade de veículos (com o tipo de comunicação IEEE 802.11p) que formam a rede veicular será um dos pontos chave para o sucesso da comunicação entre os mesmos. Nos cenários de auto-estrada, o caso mais estudado ao longo desta dissertação, existe uma grande probabilidade de a rede veicular se encontrar desligada, ou seja, de não existir um caminho entre veículos sempre ao alcance, o que diminuirá a viabilidade e qualidade das comunicações.

Para melhorar a comunicação nestes cenários podem ser integradas na rede estações fixas, conhecidas por Road Side Units (RSUs). A utilização de RSUs permite melhorar as comunicações entre veículos conseguindo reduzir, essencialmente, o atraso na entrega das mensagens, pois pretende-se que essa inserção diminua a probabilidade de partição da rede entre os veículos. Nesta Dissertação são idealizados e implementados no simulador ns-3 cenários diferentes, com diferentes densidades de veículos, que permitem avaliar a influência das RSUs nas comunicações veiculares. Pelos resultados apresentados, verifica-se que existe uma melhoria significativa nas comunicações quando as RSUs estão ligadas através de rede fixa, por exemplo a Ethernet. Com RSUs ligadas por redes sem fios, existe uma melhoria significativa das comunicações, mas esta melhoria é inferior à existente em cenários de RSUs ligadas por uma rede com fios. Quando as RSUs se encontram desligadas, verifica-se que não existe grande melhoria e as comunicações ficam mais instáveis.

Cada RSU tem um custo bastante elevado. Sendo assim, um dos desafios desta Dissertação é o de conseguir melhorar, de facto, a comunicação entre os veículos, mas reduzindo ao máximo o número de RSUs necessárias no cenário, garantindo sempre essa melhoria nas comunicações. Ao longo do trabalho desenvolvido verificou-se que o espaçamento ideal entre as RSUs, para os testes realizados, é de 1800m.

Keywords

VANET, vehicle-to-vehicle communication, simulation, ns-3, vehicular network, RSUs, OLSR, Ad hoc, Re-Healing Time, PDR, Delay, hops.

Abstract

In a Vehicular network, the density of vehicles (enabled with the standard IEEE 802.11p) that form the network is one of the keys to the success of inter-vehicular communication. In highway scenarios, which will be the focus of this Master dissertation, the probability of having a disconnected vehicular network can be very high — in other words, the probability of having no paths within reach between vehicles can be very high, which hinders communication reliability.

To improve the communication in these scenarios we can use infrastructure known as Road Side Units (RSUs). When we use RSUs as fixed points for communication in highways, we expect an enhancement on the network performance with an improvement on the propagation delay of messages between the disconnected vehicles. In this Dissertation, we idealized and implemented different scenarios in a network simulator (ns-3), with different densities of vehicles used to evaluate the influence of RSUs in inter-vehicular communication. The results show that, with RSUs interconnected by Ethernet, we have a significant improvement on the network performance. With RSUs interconnected by Wi-Fi, we also see improvements on the network performance, albeit less significant than those of the scenarios with RSUs connected by a wired network. When the RSUs are disconnected, we observe that there is no improvement and communications become unstable.

Each RSU has a high cost; therefore, in this Dissertation, we need to minimize the distribution of RSUs while still providing a significant improvement on communications. In this work we have shown that the ideal spacing between the RSUs, in our tests, was of approximately 1800m.

Índice

ÍNDICE	I
LISTA DE FIGURAS	V
LISTA DE TABELAS.....	VII
LISTA DE ACRÓNIMOS	IX
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 MOTIVAÇÃO.....	1
1.2 OBJECTIVOS.....	2
1.3 ESTRUTURA DO DOCUMENTO.....	3
2. ESTADO DA ARTE	5
2.1 INTRODUÇÃO	5
2.2 REDES VEICULARES (VANETS).....	5
2.2.1 Redes Sem fios	5
2.2.2 Definição de Redes Veiculares	6
2.2.2.1 Arquitectura.....	8
2.2.2.2 Possíveis Cenários de Implantação de Redes Veiculares ...	10
2.2.2.3 Características especiais das Redes Veiculares	11
2.2.3 Potenciais aplicações e serviços	12
2.2.4 Conceitos Básicos	13
2.2.4.1 Equipamento a bordo	13
2.2.4.2 Endereçamento.....	14
2.2.4.3 Envio de dados	14
2.2.4.4 Tecnologias de Acesso à Rede	16
2.2.4.5 Geocasting.....	17
2.2.5 Desafios técnicos.....	17
2.2.5.1 Comunicação confiável e Protocolos MAC	17
2.2.5.2 Encaminhamento e Disseminação	18
2.2.5.3 Segurança.....	19
2.2.5.4 Configuração de IP e Gestão de Mobilidade	20
2.2.6 Evolução e Progresso.....	20
2.2.6.1 Actores Principais.....	20
2.2.6.2 Normalização das actividades principais	22
2.2.7 Protocolos de Encaminhamento	22
2.2.7.1 Protocolos de encaminhamento ad hoc.....	23
2.2.7.1.1 OLSR.....	23
2.2.7.1.2 AODV	26
2.2.7.2 Protocolos de encaminhamento baseados na posição	28
2.2.8 Cálculo teórico do modelo de propagação	30
2.3 INFRA-ESTRUTURA EM REDES VEICULARES	31
2.4 CONCLUSÃO.....	35

3. IMPLEMENTAÇÃO DA PLATAFORMA DE AVALIAÇÃO	39
3.1 INTRODUÇÃO	39
3.2 PLATAFORMA DE SIMULAÇÃO	39
3.3 RESUMO DO SIMULADOR DE MOBILIDADE	40
3.4 ARQUITECTURA.....	41
3.4.1 Vehicle	41
3.4.2 Obstacle.....	43
3.4.3 Mobility Model	43
3.4.4 Lane Change Model	44
3.4.5 Highway	44
3.4.5.1 Propriedades Físicas	44
3.4.5.2 Gestão dos Veículos.....	45
3.4.5.2.1 Criação automática e Injecção de veículos.....	45
3.4.5.2.2 Mobilidade dos Veículos.....	46
3.4.5.2.3 Controlo dos veículos da parte do utilizador	46
3.5 UTILIZAÇÃO E ADAPTAÇÃO DO SIMULADOR.....	48
3.5.1 Vehicle	48
3.5.1.1 Desafios e Desenvolvimentos.....	49
3.5.2 Obstacle.....	53
3.5.3 Mobility Model	53
3.5.4 Lane Change Model	53
3.5.5 Highway	53
3.5.5.1 Funções Implementadas.....	54
3.5.6 Módulo Principal.....	56
3.5.6.1 Função Principal	58
3.5.6.2 Função InitVehicle	58
3.5.6.2.1 Função CreateRSU	59
3.5.6.2.2 Função CreateVehicle	59
3.5.6.2.3 Função ExponentialAddVehicles	60
3.5.6.3 Função ControlVehicle.....	60
3.5.6.4 Funções de Criação, Envio e Recepção de pacotes	61
3.5.6.4.1 Função Sock	61
3.5.6.4.2 Função GenerateTraffic.....	61
3.5.6.4.3 Função ReceivePacket.....	61
3.6 CONCLUSÃO	62
4. AVALIAÇÃO DE RESULTADOS	65
4.1 INTRODUÇÃO	65
4.2 CENÁRIOS	65
4.2.1 Explicação geral dos cenários	65
4.3 CENÁRIOS ESPECÍFICOS	66
4.4 CENÁRIOS COM INFRA-ESTRUTURA.....	68
4.4.1 Testes de Re-Healing Time.....	68
4.4.1.1 Conclusões.....	73
4.5 CENÁRIOS EM AUTO-ESTRADA.....	73
4.5.1 Testes de configuração das mensagens do OLSR.....	76

4.5.2	Cenários sem RSUs	76
4.5.3	Cenários com RSUs	81
4.5.3.1	Cenário com RSUs desligadas.....	81
4.5.3.2	Cenário com RSUs Ligadas	84
4.5.3.3	Cenário sem RSUs com AODV	92
4.6	CONCLUSÃO.....	95
5.	CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO	97
5.1	CONCLUSÕES.....	97
5.2	TRABALHO FUTURO	98
	BIBLIOGRAFIA.....	99

Lista de Figuras

FIGURA 1, ARQUITECTURA DAS REDES VEICULARES [10].....	8
FIGURA 2, C2C – CC ARQUITECTURA DE REFERÊNCIA, ADAPTADA [3]	9
FIGURA 3, SISTEMAS DE TRANSPORTE INTELIGENTES [12]	11
FIGURA 4, COMUNICAÇÕES COM UM ÚNICO SALTO (A) E MÚLTIPLOS SALTOS (B) [3]	15
FIGURA 5, MULTIPOINT RELAY [31].....	25
FIGURA 6, RREQ FLOODING [35].....	26
FIGURA 7, PROPAGAÇÃO DO RREP [35]	26
FIGURA 8, COMPONENTES PRINCIPAIS DO SIMULADOR, ADAPTADO DE [72].....	41
FIGURA 9, DIAGRAMA DE FLUXO DA FUNÇÃO SETUPWIFI	51
FIGURA 10, DIAGRAMA DE FLUXO DO MÓDULO PRINCIPAL	57
FIGURA 11, COMUNICAÇÃO MULTI-SALTO (TEMPO DE ASSOCIAÇÃO)	67
FIGURA 12, CENÁRIO COM RSUS LIGADAS (VEÍCULO ISOLADO)	69
FIGURA 13, <i>Re-Healing Time</i> DE UM VEÍCULO ISOLADO, COM RSUS LIGADAS E VEÍCULO A CIRCULAR A 108 KM/H	70
FIGURA 14, <i>Re-Healing Time</i> DE UM VEÍCULO ISOLADO, COM RSUS LIGADAS E VEÍCULO A CIRCULAR A 50 KM/H	71
FIGURA 15, CENÁRIO COM RSUS LIGADAS (<i>CLUSTER</i> DE VEÍCULOS).....	71
FIGURA 16, <i>CLUSTER</i> DE VEÍCULOS COM RSUS LIGADAS - COMPARAÇÃO	72
FIGURA 17, FIGURA REPRESENTATIVA DE UM CENÁRIO EM AUTO-ESTRADA COM DIVERSAS CARACTERÍSTICAS DE “SPARSE NETWORKS” INDICADAS [79]	73
FIGURA 18, CENÁRIO DE AUTO-ESTRADA, SEM RSUS.....	77
FIGURA 19, PDR PARA CENÁRIOS SEM RSUS, COM 2 FAIXAS.....	78
FIGURA 20, ATRASO PARA CENÁRIO SEM RSUS, COM 2 FAIXAS	79
FIGURA 21, NÚMERO MÉDIO DE SALTOS EM CENÁRIOS SEM RSUS.....	79
FIGURA 22, CENÁRIO DE AUTO-ESTRADA, COM RSUS	81
FIGURA 23, PDR PARA CENÁRIO COM RSUS DESLIGADAS, COM 2 FAIXAS.....	82
FIGURA 24, ATRASO PARA CENÁRIO COM RSUS DESLIGADAS, COM 2 FAIXAS	82
FIGURA 25, NÚMERO MÉDIO DE SALTOS EM CENÁRIOS COM RSUS DESLIGADAS	83
FIGURA 26, PDR PARA CENÁRIOS COM RSUS LIGADAS POR ETHERNET, COM 2 FAIXAS	85
FIGURA 27, ATRASO PARA CENÁRIOS COM RSUS LIGADAS POR ETHERNET, COM 2 FAIXAS	86
FIGURA 28, NÚMERO DE SALTOS PARA CENÁRIOS COM RSUS LIGADAS POR ETHERNET, COM 2 FAIXAS.....	86
FIGURA 29, ESQUEMA REPRESENTATIVO DAS RSUS SEPARADAS POR 2500M	87
FIGURA 30, ESQUEMA REPRESENTATIVO DAS RSUS SEPARADAS POR 4500M	87
FIGURA 31, PDR PARA CENÁRIOS COM RSUS LIGADAS POR ETHERNET, COM 2 FAIXAS	88
FIGURA 32, ATRASO PARA CENÁRIOS COM RSUS LIGADAS POR ETHERNET, COM 2 FAIXAS	88
FIGURA 33, NÚMERO DE SALTOS PARA CENÁRIOS COM RSUS LIGADAS POR ETHERNET, COM 2 FAIXAS.....	89
FIGURA 34, PDR PARA CENÁRIOS COM RSUS LIGADAS POR WI-FI, COM 2 FAIXAS	91
FIGURA 35, ATRASO PARA CENÁRIOS COM RSUS LIGADAS POR WI-FI, COM 2 FAIXAS.....	91
FIGURA 36, NÚMERO DE SALTOS PARA CENÁRIOS COM RSUS LIGADAS POR WI-FI, COM 2 FAIXAS	92
FIGURA 37, PDR PARA CENÁRIOS SEM RSUS, COM 2 FAIXAS (AODV)	93
FIGURA 38, ATRASO PARA CENÁRIOS SEM RSUS, COM 2 FAIXAS (AODV)	93
FIGURA 39, NÚMERO DE SALTOS PARA CENÁRIOS SEM RSUS, COM 2 FAIXAS (AODV)	94

Lista de Tabelas

TABELA 1, CARACTERÍSTICAS DA NORMA IEEE 802.11P 16

TABELA 2, TEMPO DE ASSOCIAÇÃO 67

TABELA 3, TEMPO DE CONVERGÊNCIA..... 68

TABELA 4, DIFERENTES TESTES AOS VALORES DA PERIODICIDADE DOS PACOTES *HELLO* E *TOPOLOGY CONTROL* 76

TABELA 5, RESULTADOS DE CENÁRIOS COM APENAS 1 FAIXA, COM A DENSIDADE DE, APROXIMADAMENTE, 4 VEH/KM 77

Lista de Acrónimos

2G – second generation of cellular wireless standards
3G – third generation of cellular wireless standards
4G – fourth generation of cellular wireless standards
AODV – Ad hoc On-Demand Distance Vector
A-STAR – Anchor-based Street and Traffic Aware Routing
ASV – Advanced Safety Vehicle
AU – Application Unit
C2C-CC – Car 2 Car Communication Consortium
CPU – Central Processing Unit
CSMA – Carrier Sense Multiple Access
DRIVE-IN – Distributed Routing and Infotainment through Vehicular Inter-Networking
DSDV – Destination-Sequenced Distance Vectoring
DSR – Dynamic Source Routing
DSRC – Dedicated Short-Range Communications
ETC – Electronic Toll Collect
GPF – Geodesic Packet Routing
GPRS – General Packet Radio Service
GPS – Global Positioning System
GPSR – Greedy Perimeter Stateless Routing
GSM – Global System for Mobile Communications
GSR – Geographic Source Routing
IDM – Intelligent Driver Model
IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers
IP – Internet Protocol
LTE – Long Term Evolution
MAC – Media Access Control
MANET – Mobile *Ad hoc* NETWORK
MPR – Multipoint Relay
NS-2 – Network Simulator version 2
NS-3 – Network Simulator version 3
OBU – On Board Unit
OLSR – Optimized Link State Routing
PC – Personal Computer
PDR – Packet Delivery Ratio
RERR – Route Error
RREP – Route Reply
RREQ – Route Request
RSU – Road Side Unit
TC – Topology Control
UDP – User Datagram Protocol
UMTS – Universal Mobile Telecommunications System

UWB – Ultra-wideband
V2I – Vehicle to Infrastructure
V2R – Vehicle to Road
V2V – Vehicle to Vehicle
VANET – Vehicle *Ad hoc* Network
VII – Vehicle Infrastructure Integration
VSC – Vehicle Safety Consortium
WAVE – Wireless Access in Vehicular Environments
Wi-Fi – Wireless Fidelity
WiMAX – Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN – Wireless Local Area Network
WUSB – Wireless USB
ZOR – Zone of Relevance

1. Introdução

1.1 Motivação

Actualmente, começa a ser cada vez mais usual o recurso ao uso de dispositivos com informação *Global Positioning System* (GPS), tecnologias de redes sem fios e sensores. Perante estes desenvolvimentos, é expectável que os veículos automóveis tenham a capacidade de, brevemente, operar em rede, partilhando informação entre eles. Essa informação poderá ser de diferentes tipos, desde informações de congestionamento de tráfego a sinais de alarmes de acidentes, podendo as decisões de navegação e segurança ser efectuadas com base em mensagens enviadas pelos nós (veículos) vizinhos.

Num aspecto mais global, este tipo de informação poderá também ser utilizada para integrar nos sistemas GPS e poder incluir novos tipos de informação nestes dispositivos, tais como a determinação de melhores caminhos, tendo em conta factores como o congestionamento das vias. As comunicações veiculares poderão também ser um incentivo para o aparecimento de outros tipos de aplicações como a disseminação de informação baseada em localização, ‘*social networking*’ e jogos interactivos e distribuídos.

As redes que permitem a comunicação entre veículos, as *Vehicular Ad hoc NETWORKS* (VANETs) são dinâmicas por natureza, constituídas por nós com grande mobilidade. Desta forma, ocorrem frequentemente partições na rede, levando a períodos sem ligação entre os veículos. Como os veículos circulam a velocidades diferentes e a sua posição na estrada depende de muitos factores, estes nem sempre têm outros veículos na sua gama de transmissão para poder comunicar. Os veículos encontram-se normalmente agrupados em *clusters* dinâmicos, que são formados e destruídos de acordo com a densidade e mobilidade dos veículos. Estes factores poderão originar situações de grandes atrasos na entrega de pacotes, incomportáveis para este tipo de comunicações. Por fim, o facto de a penetração de sistemas veiculares aumentar de forma gradual, com uma baixa penetração nos primeiros anos, implicará uma elevada fracção de veículos sem ligação no início de implementação destes sistemas.

Sendo assim, perante este cenário, surge a necessidade de inclusão de pontos fixos de comunicação nas estradas, *Road Side Units* (RSUs), com o objectivo de melhorar a conectividade da rede. As RSUs são estruturas capazes de fazer encaminhamento dos pacotes com o objectivo de, em virtude da melhoria de ligação da rede que se obtém com a inserção dessas unidades, evitar estes grandes atrasos. No entanto, cada RSU tem um custo associado, pelo que uma experiência interessante passa por perceber até que ponto a distância das RSUs interfere no valor dos atrasos na entrega dos pacotes, ou no sucesso dessa entrega (rácio de entrega), e qual o balanço que deve ser feito entre o binómio “melhoria das comunicações – número de RSUs necessárias” pois, a nível de custo, determinadas distribuições de RSUs podem tornar-se insustentáveis.

Surge assim a necessidade de se efectuarem análises para diversas situações diferentes de modo a ser possível determinar o número mínimo de RSUs que permite que se realizem comunicações veiculares fiáveis. As RSUs podem ou não estar ligadas umas com as outras pelo que se vai testar este impacto também.

Esta Dissertação insere-se dentro do projecto *Distributed Routing and Infotainment through VEHicular Inter-Networking* (DRIVE-IN) [1], que tem como objectivo principal investigar como é que a comunicação veículo a veículo pode melhorar a experiência dos utilizadores, e a eficiência global de utilização de comunicação de veículos e da estrada.

1.2 Objectivos

No âmbito do projecto mencionado (DRIVE-IN), têm sido abordadas as comunicações veiculares, nomeadamente o efeito causado pela introdução de unidades físicas (RSUs) para transporte de informação entre veículos em faixas contrárias na auto-estrada. O objectivo dessas unidades físicas passa por melhorar a comunicação em cenários cuja densidade de veículos promova o aparecimento de zonas sem comunicação (espaçamentos entre veículos que impedem o estabelecimento de comunicação entre estes).

A estabilidade das rotas entre veículos ao longo da auto-estrada e o efeito do encaminhamento também têm sido objecto de estudo, sendo aqui que entra uma parte da colaboração desta Dissertação, pois um dos pontos que se pretende analisar é o efeito que os protocolos de encaminhamento inserem nas comunicações veiculares.

Esta Dissertação tem como objectivo idealizar e implementar diferentes cenários de comunicações veiculares, com e sem a utilização de RSUs, e verificar o impacto nas comunicações entre veículos nestes diferentes cenários.

Este estudo experimental de comunicação entre veículos, em larga escala, tem como recurso uma plataforma de emulação/simulação (*Network Simulator version 3 - NS-3*) [2] que nos permite reproduzir alguns testes mais simples realizados na prática, transpondo para testes mais complexos que dificilmente poderiam ser realizados em cenários reais. Sendo assim, existem dois objectivos principais diferentes: o primeiro consiste em complementar os resultados dos ensaios reais, para verificar as diferenças obtidas e comparar os resultados obtidos na realidade com os da simulação; o segundo consiste em testar cenários novos, de preferência cenários em auto-estrada, com uma escala elevada, os quais não são facilmente reproduzidos na realidade.

Em síntese, o estudo efectuado inclui os seguintes tópicos, por ordem de prioridade:

- Comparação de comunicações veículo a veículo, com e sem estações físicas;
- Comparação de comunicações veículo a veículo com diferentes configurações de estações fixas;
- Comparação de comunicações veículo a veículo com diferentes interligações de estações fixas.

Para isso, foi necessário realizar uma série de tarefas, tais como:

- Estudo das evoluções recentes em termos de redes veiculares, comunicações utilizador a utilizador e suas aplicações;
- Interpretação e adaptação a um simulador que implementa um modelo de mobilidade veicular, existente no NS-3.10;

- Suportar a capacidade de configuração de uma rede *Internet Protocol* (IP) no simulador;
- Configurar correctamente os protocolos de encaminhamento nos nós (utilizando os protocolos de encaminhamento existentes no simulador);
- Implementar um mecanismo de comunicação em redes veiculares, que funcione sobre a camada IP;
- Desenvolvimento de uma *testbed* virtual que permitia realizar os testes necessários;
- Projectar cenários relevantes para análise das métricas pretendidas;
- Implementar o suporte de mediação das métricas pretendidas: atraso, rácio de entrega de pacotes (*Packet Delivery Ratio* – PDR) e número de saltos;
- Implementar o suporte dos elementos da infra-estrutura, (RSUs) desligadas e interligadas (com redes sem e com fios), e integrar as RSUs na comunicação veicular e no encaminhamento;
- Proceder à elaboração de testes, recolha de resultados e análises comparativas de modo a concluir sobre os cenários estudados, com e sem suporte de infra-estrutura, e com os diferentes tipos de infra-estrutura.

1.3 Estrutura do documento

Esta Dissertação está organizada da seguinte forma, consoante os diferentes capítulos:

- No capítulo 1 pretendemos apresentar as motivações, revelar os objectivos que se pretendem atingir no final da Dissertação e falar apresentar a estrutura do documento;
- No capítulo 2 é realizada uma avaliação do estado actual das Redes Veiculares. Para isso, começa-se por definir as redes veiculares e em que aspectos estas se distinguem das restantes redes sem fios, e quais são as suas características particulares. Neste capítulo, pretende-se dar um pouco mais de ênfase aos protocolos de encaminhamento utilizados, não deixando de fazer referência a outro tipo de protocolos, mais apropriados a redes veiculares. Outro aspecto devidamente apresentado ao longo deste capítulo é o trabalho relacionado, e de que forma o trabalho realizado ao longo desta Dissertação é diferenciado dos estudos realizados nos trabalhos relacionados;

- O capítulo 3 apresenta a implementação da plataforma de simulação. Este trabalho passa, em primeiro lugar, por criar uma *testbed* virtual que permita simular um cenário de auto-estrada a ser usado no desenrolar das experiências, assim como cenários mais simples com infra-estruturas. Para isso, é utilizado o simulador de redes de nome NS-3. Neste capítulo, será feita uma breve introdução ao simulador de redes usado, será apresentado o simulador (com um modelo de mobilidade implementado) utilizado como base e, aí, será apresentada de que forma o trabalho existente no simulador foi aproveitado, o que foi modificado e o que foi implementado de raiz, de modo a cumprir os requisitos deste trabalho experimental. Este capítulo serve para deixar claro todo o trabalho desenvolvido de modo a se conseguir realizar os testes pretendidos;
- No capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados. A abordagem seguida passa por explicar cada cenário idealizado, nomeadamente o objectivo que se teve ao definir a realização daquele tipo de teste, assim como de que forma é que cada teste foi idealizado. Após a descrição de cada cenário, são apresentados os resultados e analisadas as métricas de PDR, atraso e número de saltos, discutindo o desempenho dos mesmos
- No capítulo 5 é realizada uma análise e são discutidas as comparações finais dos resultados, permitindo fazer-se uma avaliação final a nível dos objectivos propostos. Este capítulo fará uma conclusão de todo o trabalho e apresenta possíveis melhoramentos futuros para continuação do trabalho.

2. Estado da arte

2.1 Introdução

Para se conseguir fazer um ponto de situação da realidade actual das Redes Veiculares foram consultados essencialmente livros [3] e artigos conforme as referências indicadas que, todos juntos, ajudaram a ter um conhecimento mais aprofundado sobre redes veiculares.

Actualmente, os automóveis têm incorporado diferentes avanços tecnológicos que melhoram a experiência de passageiros e condutores, sendo alguns exemplos os sensores de travagem, capazes de detectar e advertir o condutor da proximidade de veículos, e alarmes de velocidade acima do permitido. Geralmente, esses sistemas são baseados em sensores e actuadores, cada vez mais sofisticados, que permitem ao veículo detectar sinais no ambiente e informar o condutor.

O próximo passo da evolução tecnológica será dado em sistemas de comunicação que possibilitem a interacção entre os diferentes veículos, sendo esse aspecto que se pretende explorar e sendo para isso que se pretende contribuir com a realização desta Dissertação, nomeadamente ao nível de simulação de diferentes cenários, em grande escala, que não teriam possibilidade de ser realizados, nesta fase, em cenários reais. O objectivo principal desses sistemas é possibilitar a comunicação de utilizadores móveis e oferecer as condições necessárias para que aplicações com diferentes requisitos sejam atendidas satisfatoriamente, consoante se tratem de aplicações de segurança ou não. Esses sistemas de comunicação entre veículos formam as chamadas redes veiculares.

Este capítulo está dividido em duas grandes secções. Na primeira, descrevem-se as redes veiculares, nomeadamente de que forma se distinguem das restantes redes sem fios, que características especiais apresentam (abordando determinadas características com maior ou menor detalhe, consoante a importância para esta Dissertação), qual o ponto de situação a nível de desenvolvimento e implementação e de que forma se atingiu o panorama actual.

Na segunda, é feito um resumo ao nível do trabalho que tem vindo a ser realizado, mais concretamente a nível de simulações com infra-estruturas, que é o foco de trabalho essencial. Além disso, será também analisado o tipo de trabalho que tem vindo a ser feito a nível de apresentação e comparação de protocolos de encaminhamento, passíveis de serem utilizados em simulação (neste caso, o *Optimized Link State Routing - OLSR* e o *Ad hoc On-Demand Distance Vector - AODV*), para se poder interpretar mais facilmente os resultados.

2.2 Redes Veiculares (VANETs)

2.2.1 Redes Sem fios

Várias têm sido as tecnologias de redes sem fios que se têm popularizado ao longo dos últimos tempos, havendo uma larga escala de dispositivos móveis disponíveis no mercado que ates-

tam essa popularização. O facto de possibilitarem a mobilidade dos dispositivos e possuírem um baixo custo de instalação e manutenção, com possibilidade de serem instaladas em locais de difícil acesso, não está alheio a este sucesso.

Uma rede móvel sem fios é uma rede cujos nós possuem algum tipo de mobilidade, podendo existir, no entanto, alguns nós fixos.

Em virtude das características da mobilidade dos seus nós, uma rede pode ser classificada como infra-estruturada ou em modo *ad hoc*. No primeiro caso, toda a comunicação entre dispositivos móveis da rede ocorre através de nós fixos, responsáveis pela operacionalidade da rede (um exemplo claro desses nós fixos são as estações base das redes *third generation of cellular wireless standards* - 3G). Desta forma, os dispositivos móveis, mesmo próximos entre si, comunicam uns com os outros através da infra-estrutura.

No caso da rede em modo *ad hoc* (*Mobile Ad hoc Network – MANET*), a rede é composta por dispositivos móveis com capacidade para comunicarem entre si, não havendo necessidade de se recorrer a uma infra-estrutura pré-existente pois, por exemplo, sempre que dois nós distantes entre si querem estabelecer uma comunicação, são utilizados os nós intermédios (com o auxílio de um protocolo de encaminhamento que estabelecerá a melhor rota de comunicação possível) que encaminham os pacotes da origem ao destino. Nestas redes, poderão existir problemas no encaminhamento efectuado, porque os diferentes nós não têm uma localização definida devido à sua mobilidade (estes problemas serão objecto de estudo mais à frente).

As redes *ad hoc* veiculares (*VANETs*) são um dos tipos de *MANETs* em que os nós móveis (neste caso, veículos) alcançam altas velocidades. Os nós da rede VANET estão sujeitos a períodos sem nenhum tipo de ligação entre veículos, em virtude da rarefacção de tráfego veicular, ou a atrasos na recepção de pacotes resultantes, geralmente, das velocidades elevadas dos veículos e do cenário em que estão inseridos.

Uma forma de contornar esse problema de aparecimento de lacunas entre os veículos, particularmente quando a densidade de tráfego é mais reduzida, passa pela inserção de estações fixas (as RSUs) na estrada. Estas, no caso de estarem ligadas entre si e terem uma densidade elevada (com custos mais elevados, pois quanto maior o número de unidades, maior será o investimento a fazer), conseguem fazer encaminhamento de pacotes de um veículo fonte para outro veículo que não esteja no alcance deste

No caso de a densidade das RSUs não ser significativa, independentemente de estarem ligadas ou desligadas entre si, estas efectuam o armazenamento da informação até o veículo destino ou um veículo intermédio estar ao seu alcance e aí, finalmente, é feito o encaminhamento do pacote, conseguindo-se eliminar a perda de pacotes devido ao espaçamento entre os veículos, mas inserindo uma componente de atraso que é o denominado *Re-Healing Time*.

2.2.2 Definição de Redes Veiculares

A rápida e constante evolução dos dispositivos de comunicação sem fios tem facilitado uma implementação crescente das redes *ad hoc*, cuja principal característica passa por possibilitar a comunicação entre diferentes nós sem ser necessário recorrer a uma infra-estrutura. É possível

observar que as redes móveis sem fios sobressaem por permitirem que os nós se movam livremente, por serem mais acessíveis e por serem de rápida instalação.

As Redes Veiculares são, então, uma nova classe destas redes *ad hoc*, que têm emergido graças ao avanço da tecnologia sem fios e, também, das tecnologias incorporadas na própria indústria automóvel.

Estas redes são formadas espontaneamente entre veículos em movimento (desde que estes estejam equipados com as devidas interfaces sem fios) e o seu principal objectivo passa por garantir, de forma satisfatória, a comunicação entre os diversos utilizadores da rede, oferecendo as condições necessárias para que diversas aplicações, com diferentes requisitos, sejam atendidas. Essa comunicação, como não podia deixar de ser, é feita com o auxílio de veículos capazes de enviar, receber, armazenar e encaminhar os pacotes pela rede.

Estas redes (*VANETs*) funcionam no modo *ad hoc*, permitindo a comunicação entre veículos e entre os veículos e os equipamentos fixos nas proximidades (*RSUs*) visando não só a segurança na circulação de veículos, recorrendo a diversas aplicações (tais como a monitorização cooperativa do tráfego, o aviso das condições da estrada, o auxílio a cruzamentos sem sinalização e a prevenção de colisões), mas também, possibilitar a comunicação entre condutores e passageiros, conforme já foi referido.

Os veículos (nós da rede) podem ser de diferentes tipos: particulares, empresa privada, transportes públicos (como táxis ou autocarros), de serviço público (como carros de polícia ou ambulâncias), e os equipamentos fixos podem pertencer ao estado, a operadores de rede privados, etc. É nisto, essencialmente, que as redes veiculares se distinguem das restantes redes pois os nós destas redes, representados pelas diferentes viaturas, apresentam alta mobilidade e trajectórias que acompanham os limites das vias públicas.

De facto, as redes veiculares são promissoras para permitir diversos serviços de comunicações para condutores e passageiros. Estas redes estão a atrair uma atenção considerável da comunidade científica, assim como da indústria automóvel. Este interesse elevado é também demonstrado pelas autoridades governamentais e pelas organizações responsáveis pela normalização.

Neste contexto, emergiu na América do Norte um sistema de comunicações dedicado, de curto alcance (*Dedicated Short-Range Communications - DSRC*) onde, em 2003, foram aprovados 75 MHz de espectro pela U.S. FCC (*Federal Communication Commission*) reservados a este tipo de comunicações veiculares. Por outro lado, foi iniciado na Europa o *Car-to-Car Communication Consortium* (C2C-CC), que teve origem nos seis construtores de automóveis Europeus (Audi [4], BMW [5], DaimlerChrysler [6], Fiat [7], Renault [8] e Volkswagen [9]), com o objectivo principal de aumentar a segurança nas estradas. O *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) também avançou dentro da família IEEE 1609 de normas para o acesso sem fios em ambientes de comunicação veicular (*Wireless Access in Vehicular Environments - WAVE*).

No entanto, subsistem uma série de desafios para a adopção de redes veiculares em larga escala. Os principais prendem-se com a alta mobilidade dos nós, o dinamismo dos cenários e a escalabilidade no que diz respeito ao número de nós. Outros desafios resultam da perda de conectividade durante a transmissão dos dados e o tempo reduzido em que dois nós permanecem em contacto. É de notar que, perante estas dificuldades, os protocolos de encaminhamento cria-

dos para outro tipo de redes sem fios, como as redes móveis *ad hoc* (MANETs) não são adequados.

2.2.2.1 Arquitectura

A arquitectura das redes veiculares define a forma como os nós se organizam e a forma como estes comunicam entre si. Actualmente, existem então três arquitecturas principais, representadas na Figura 1:

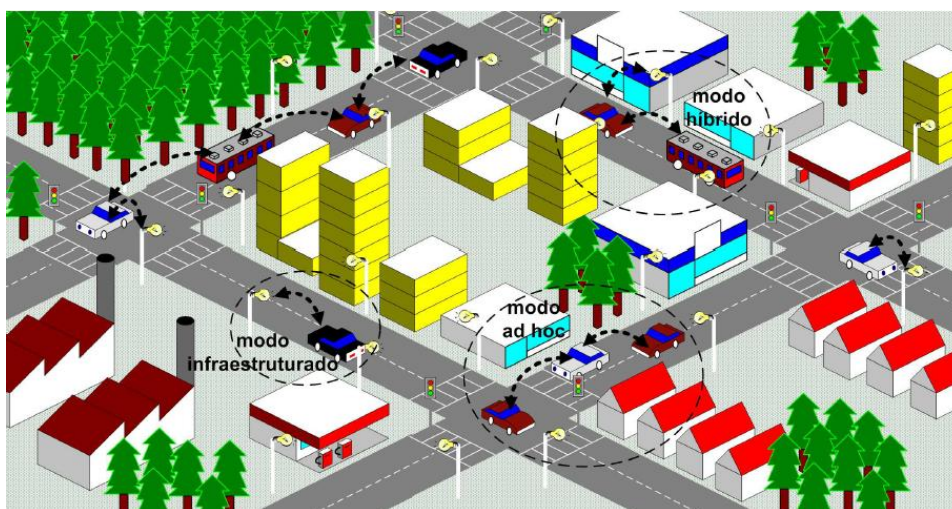


Figura 1, Arquitectura das Redes Veiculares [10]

- *Ad hoc* puro (Vehicle to Vehicle – V2V);
- Infra-estruturada (Vehicle to Infrastructure – V2I);
- Híbrida (Vehicle to Road – V2R).

Na arquitectura *ad hoc* os veículos funcionam como *routers* e encaminham tráfego através de múltiplos saltos. Apesar de esta ser a configuração mais simples, uma vez que, ao contrário das restantes arquitecturas, não exige o recurso a nenhuma infra-estrutura, a conectividade da rede está fortemente dependente da densidade e do padrão de mobilidade dos veículos.

Para evitar este tipo de problemas, a arquitectura infra-estruturada recorre a nós estáticos distribuídos ao longo das ruas ou estradas (as *RSUs*). Esses nós centralizam todo o tráfego da rede, servindo como nós intermediários das comunicações. A grande vantagem do modo infra-estruturado é o aumento da conectividade e a possibilidade da comunicação com outras redes como, por exemplo, a Internet. Como desvantagem aparece o facto de a conectividade da rede só ser garantida mediante um número elevado de elementos fixos, o que pode elevar, de forma considerável, o custo da rede.

Por fim, a arquitectura híbrida é uma solução intermédia entre as duas soluções anteriores. Nesta, é utilizada uma infra-estrutura mínima para aumentar a conectividade da rede e possibilitar a interligação, existindo também a possibilidade de os veículos comunicarem por múltiplos saltos.

Uma arquitectura de referência tem sido proposta dentro da *Car-to-Car Communication Consortium* (C2C-CC) [11], distinguindo-se então três domínios: do veículo em si, *ad hoc* e das infra-estruturas.

A Figura seguinte ilustra estas três arquitecturas.

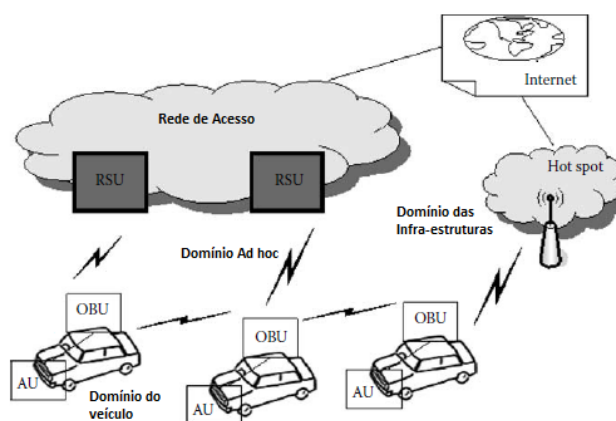


Figura 2, C2C – CC arquitectura de referência, adaptada [3]

Por domínio do veículo entende-se a rede local dentro de cada veículo, composta por dois tipos de unidades: as *on-board units* (OBU) e as *application units* (AUs).

Uma OBU é um dispositivo existente no veículo que tem capacidade de comunicação (sem fios e/ou por cabo), e uma AU é um dispositivo que serve para executar uma, ou mais, aplicações, fazendo uso da sua capacidade de comunicação com as OBUs. Uma AU pode ser parte integrante de um veículo e estar permanentemente ligada a uma OBU, ou pode ser um dispositivo portátil, tal como um *Personal Computer* (PC) portátil, ou mesmo um PDA, que possa ser ligado a uma OBU. Geralmente, essa ligação OBU-AU é feita por cabo; no entanto, também pode ser feita por rede sem fios (usando, por exemplo, Bluetooth, *Wireless USB* - WUSB ou *Ultra-wideband* - UWB). Esta distinção entre OBU e AU é lógica, sendo possível também que ambas possam formar uma única unidade física.

O domínio da rede *ad hoc* é composto por veículos equipados com OBUs e por *road side units* (RSUs) que estão dispostas ao longo da estrada. As OBUs dos diferentes veículos acabam por formar uma rede móvel *ad hoc* (MANET) em que cada OBU é equipada com dispositivos de comunicação incluindo, pelo menos, um dispositivo de comunicação sem fios, de curto alcance, dedicado a situações relacionadas com a segurança nas estradas. As OBUs e as RSUs acabam por poder ser vistas como nós (móveis e estáticos, respectivamente) de uma rede *ad hoc*. Uma RSU pode estar ligada a uma infra-estrutura de rede que, por sua vez, pode estar ligada à Internet. Estas podem também comunicar umas com as outras directamente ou via múltiplos saltos, e o seu objectivo primordial passa por melhorar a segurança na estrada executando aplicações especiais e enviando, recebendo e fazendo encaminhamento dos dados no domínio *ad hoc*.

Por fim, relacionado com o domínio das infra-estruturas, existem dois tipos de acesso ao mesmo: pelas RSUs ou por *hot spots*. As RSUs devem permitir que as OBUs tenham acesso à infra-estrutura e, conseqüentemente, que tenham ligação à Internet. Outra hipótese que as OBUs têm

de se conseguir ligar à Internet é feita através de *Wireless Fidelity* (Wi-Fi) *hot spots* públicos, comerciais ou privados. Na ausência de RSUs e de *hot spots*, no caso de as OBU's estarem integradas com sistemas como o *Global System for Mobile Communications* (GSM), *General Packet Radio Service* (GPRS), *Universal Mobile Telecommunications System* (UMTS), *Worldwide Interoperability for Microwave Access* (WiMax) ou *fourth generation of cellular wireless standards* (4G), então podem recorrer a essa solução.

O consumo de energia é um factor crítico nas operações com redes móveis, como as MANETs, pois os nós são dispositivos sem fios, alimentados por baterias cujas capacidades de armazenamento são limitadas devido às restrições de volume e de peso dos equipamentos. Apesar disso, nas redes veiculares, existe a vantagem destas disponibilizarem uma fonte de energia quase ilimitada, uma vez que as baterias dos veículos são recarregadas frequentemente evitando, assim, qualquer tipo de restrição em relação ao consumo de energia.

2.2.2.2 Possíveis Cenários de Implantação de Redes Veiculares

Como já foi mencionado, existem dois tipos principais de cenários de comunicação:

- De veículo para veículo (V2V);
- De veículo para infra-estrutura (V2I).

Estes tipos de cenários de comunicação permitem a implantação de uma série de opções para as redes veiculares.

Assim, a implantação das redes veiculares pode ser integrada em *hot spots* ao longo da estrada, sendo esses *hot spots* operados individualmente em casa ou no escritório, operados por fornecedores de serviço de internet sem fios ou, ainda, integrados nos operadores existentes. Os veículos podem comunicar directamente com outros veículos sem uma infra-estrutura de comunicação, podendo cooperar e transmitir informações em nome do outro (comunicação V2V). Uma combinação destes dois cenários (comunicação V2V ou V2I), tal como já referido anteriormente, é também possível.

Além disso, a arquitectura futura de sistemas de transporte inteligentes, representada na Figura 3, considera os veículos como nós activos que são responsáveis pela recolha e encaminhamento de informações críticas. Por conseguinte, a coexistência de redes veiculares com redes de sensores deverá, possivelmente, tornar-se uma realidade, com os veículos a serem capazes de armazenar e processar informações com recurso a sensores inteligentes, trocando informações com outros nós (fixos ou móveis) naquilo que poderá ser denominado sistema de comunicação global.

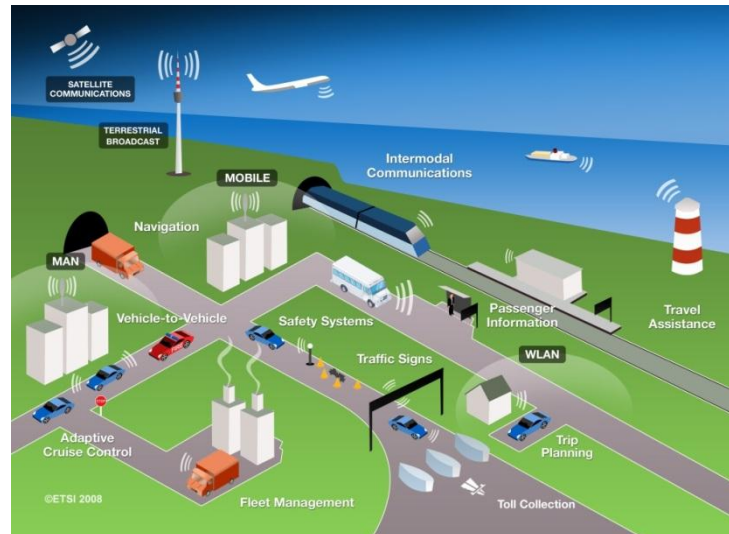


Figura 3, Sistemas de Transporte Inteligentes [12]

2.2.2.3 Características especiais das Redes Veiculares

As redes veiculares têm características e comportamentos que as distinguem facilmente de outro tipo de redes móveis. Em comparação com outro tipo de redes de comunicação podemos referir as seguintes vantagens:

- **Potência de transmissão ilimitada:** As questões relacionadas com a potência do dispositivo móvel, ao contrário do que sucede nas redes clássicas *ad hoc*, não são uma restrição significativa, uma vez que o próprio veículo (nó) pode fornecer energia contínua para a computação e comunicação dos dispositivos;
- **Capacidade computacional mais elevada;**
- **Mobilidade previsível:** Ao contrário das redes clássicas de *ad hoc*, onde é difícil prever a mobilidade dos nós, os veículos têm tendência a ter uma movimentação bem mais previsível, uma vez que os seus movimentos, geralmente, estão limitados às estradas. Por outro lado, a informação da posição de cada veículo também pode ser facilmente acedida, através do recurso a tecnologias como o GPS. Sabendo a velocidade média de um veículo, a velocidade actual e a trajectória de cada veículo, é possível prever a sua posição futura.

No entanto, as redes veiculares não têm apenas vantagens. Existem alguns desafios que necessitam de ser tidos em conta, quando falamos deste tipo de redes, tais como:

- **Possível larga escala:** Ao contrário da maioria das redes *ad hoc* estudadas na literatura, que geralmente assumem um tamanho limitado para a rede, as redes veiculares podem-se estender ao longo das estradas, atingindo dimensões muito elevadas, com a possibilidade de existirem muitos nós a formarem essas redes;
- **Mobilidade elevada:** O ambiente em que as redes veiculares operam é muito dinâmico e inclui configurações extremas. Por exemplo, em cenários de auto-estrada, a velocidade relativa entre os veículos pode atingir valores próximos dos 240 km/h. Por sua vez, a densidade pode ser de apenas 1-2 veículos por km em ambientes com baixa densidade de tráfego. No que diz respeito aos cenários citadinos, a velocidade relativa é de cerca de 60 km/h e a densidade dos nós pode ser muito elevada, em particular durante a hora de ponta.
- **Redes Fragmentadas:** As redes veiculares têm a particularidade de poderem estar, por diversas vezes, fraccionadas em virtude da natureza dinâmica do tráfego que origina situações com lacunas (zonas sem comunicação) entre os veículos, gerando, com isso, cenários com densidades de veículos muito reduzidas e originando *clusters* de nós isolados, sem ser possível estabelecer comunicação uns com os outros.
- **Conectividade e topologia da rede:** Os cenários das redes veiculares são muito diferentes dos cenários habituais de redes *ad hoc*. Os veículos, ao moverem-se e ao trocarem de posição constantemente, tornam os cenários extremamente dinâmicos, acabando por ocorrer falhas de ligação frequentes das ligações entre os nós. Posto isto, é fácil de verificar que o grau de ligação de uma rede veicular se encontra fortemente relacionado a dois factores: o alcance das ligações sem fios e a fracção de veículos participantes nas comunicações, onde só uma parte dos veículos existentes na estrada pode estar equipada com interfaces sem fios.

2.2.3 Potenciais aplicações e serviços

A primeira visão das redes veiculares inclui aplicações de segurança, em tempo real, para condutores e passageiros, oferecendo segurança e fornecendo ferramentas essenciais ao condutor para decidir o melhor caminho a seguir. Estas aplicações têm como objectivo minimizar o número de acidentes e melhorar as condições do tráfego, fornecendo aos condutores e passageiros informações úteis, tais como avisos de colisões que tenham ocorrido em determinado momento, alarmes a informar dos sinais de trânsito, etc.

Hoje em dia, as redes veiculares são promissoras no que diz respeito a um número de serviços úteis orientados para o condutor/passageiros que incluem conexões à Internet, explorando as infra-estruturas existentes (tal como já foi referido), possibilitando o pagamento electrónico e oferecendo uma série de serviços multimédia, pensados para melhorar o bem-estar dos ocupantes da viatura.

Uma grande variedade de redes de comunicação tais como *second generation of cellular wireless standards* (2G) e 3G, *Wireless Local Area Networks* (WLANs) IEEE 802.11 a/b/g/p e WiMAX podem ser exploradas de modo a permitir novos serviços pensados para os condutores/passageiros (à parte das aplicações de segurança) tais como '*infomobility*' (possibilidade de ter acesso a informação a qualquer altura), ou aplicações de entretenimento que dependem da rede.

Quanto ao potencial das aplicações acabadas de referir, as redes veiculares abrem novas possibilidades de negócio para a indústria automóvel, para os operadores de rede, fornecedores de serviços e para os operadores integrados em termos de implantação das infra-estruturas, prestação de serviços e comercialização.

Para o caso das aplicações relacionadas com a segurança, os operadores da rede asseguram que a autenticação é feita de modo a garantir que apenas utilizadores autenticados consigam participar na troca de informação. Por outro lado, em aplicações que não estão relacionadas com a segurança, os operadores de rede e/ou os fornecedores de serviço, para além de permitirem o acesso à rede, possibilitam que seja feita a facturação electrónica de cada veículo. Mais uma vez deve ser realçado que uma rede *ad hoc* necessita de um certo nível de penetração de rádios e necessita de uma elevada densidade de veículos para ter uma comunicação mais fiável.

Uma forma de contornar esse problema passaria por implantar novas infra-estruturas (RSUs), em virtude das necessidades de cada troço (isto é, mediante o número de RSUs necessárias para garantir a conectividade da rede em questão). No entanto, como se sabe, o custo dessas infra-estruturas é elevado pelo que é necessário estudar alternativas. Uma das hipóteses, provavelmente a mais viável, passa por aproveitar as infra-estruturas já existentes dos operadores de rede que, inclusive, já possuem uma autenticação e um mecanismo de segurança confiáveis. Sendo assim, existem uma série de desafios técnicos que necessitam de ser resolvidos com o objectivo de proliferar as redes veiculares em larga escala. Na secção 2.2.5 tentar-se-á fazer um apanhado geral desses desafios, mas antes vão-se abordar os conceitos básicos das redes veiculares.

2.2.4 Conceitos Básicos

Nesta secção serão descritos alguns conceitos básicos que são importantes para compreender as aplicações das redes veiculares.

2.2.4.1 Equipamento a bordo

Geralmente assume-se que os veículos que constituem uma rede veicular têm um equipamento a bordo designado por OBU. De seguida, vamos apresentar uma lista de *hardware* que a maioria dos artigos assume que existem (estão disponíveis) em cada veículo que se considere devidamente equipado para poder fazer parte de uma rede veicular:

- Um CPU (*Central Processing Unit*) que implementa as aplicações e os protocolos de comunicação;

- Um equipamento sem fios que transmita e receba dados quer dos veículos vizinhos, quer das infra-estruturas (RSUs) dispostas ao longo da estrada;
- Um receptor GPS que dê, com relativa margem de segurança, o posicionamento actual de um veículo bem como o tempo de sincronização da informação;
- Sensores apropriados para medir vários parâmetros que precisam de ser medidos e, eventualmente, transmitidos;
- Uma interface *input/output* que permita a interacção humana com o sistema.

2.2.4.2 Endereçamento

Para a maioria das aplicações é necessário algum tipo de esquema de endereçamento. A maioria das redes veiculares pode ser classificada como redes *ad hoc*, o que significa que os nós (quer sejam veículos, quer sejam RSUs) se organizam por eles próprios numa rede. Sendo assim, o mesmo tipo de esquema de endereçamento pode ser usado:

- **Fixo** – em que o endereçamento deste tipo significa que cada nó tem um endereçamento fixo, atribuído por algum mecanismo no momento em que esse nó se junta à rede; O nó vai usar esse endereço enquanto fizer parte da rede. Este é o esquema de endereçamento mais usado na Internet (excepção feita ao IP móvel). A maioria das aplicações e protocolos de uma rede *ad hoc* assumem um esquema de endereçamento fixo.
- **Geográfico** – em que o endereçamento deste tipo significa que cada nó é caracterizado pela sua posição geográfica. Quando o nó se move, o seu endereço muda. Além disso, ainda podem ser usados atributos adicionais para se seleccionar um subconjunto de veículos. Como exemplos temos:
 - A direcção em que o veículo se move;
 - O identificador da estrada (por exemplo, número, nome, etc);
 - O tipo de veículo (carro, camião, etc);
 - Algumas características físicas (como por exemplo determinado veículo “ser maior do que”, “pesar mais do que”, “com velocidade superior a”, etc);

2.2.4.3 Envio de dados

O objectivo de todas as aplicações descritas passa por disseminar dados entre veículos com a possibilidade, também, de se incluírem comunicações com as infra-estruturas (RSUs).

De seguida, descrever-se-ão conceitos importantes, relacionados com a disseminação de dados.

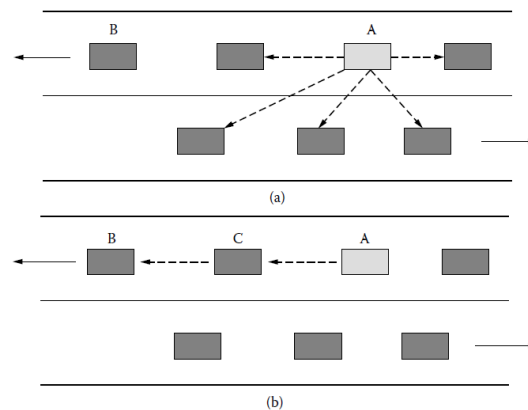


Figura 4, Comunicações com um único salto (a) e múltiplos saltos (b) [3]

Primeiro, como se pode verificar na Figura 4, o envio de dados pode ser realizado por uma comunicação de apenas um salto ou por múltiplos saltos. O envio de dados de apenas um salto é geralmente implementado por *broadcast* na camada *Media Access Control* (MAC), conforme se pode ver na Figura 4 (a), onde o Veículo A pode enviar a mensagem apenas para os veículos que estão no seu alcance de transmissão (ou seja, o veículo B nunca recebe a mensagem). Este tipo de disseminação também é usado quando existem infra-estruturas de controlo das comunicações. A disseminação por múltiplos saltos está fortemente relacionada com as VANETs. Em redes veiculares, os dados são muitas vezes transmitidos por vários saltos, onde os veículos intermediários agem como retransmissores, tal como pode ser visto na Figura 4 (b), em que o veículo C pode fazer retransmissão da mensagem para que os veículos que não estão no alcance de transmissão do veículo A (neste caso, o exemplo representado na Figura 4 (b) corresponde ao veículo B estar fora do alcance do veículo A) possam receber também eles a mensagem. Deste modo, um sistema com múltiplos saltos requer uma camada de rede de encaminhamento que permita esse tipo de envio. Também existem variantes híbridas em que a informação é enviada por múltiplos saltos até atingir a RSU mais próxima e, depois, os dados são transmitidos para os veículos relevantes recorrendo a uma disseminação de apenas um salto.

Segundo, os dados podem ser enviados por *unicast*, *multicast* ou *broadcast*. Por *unicast*, existe apenas um veículo que envia os dados e um veículo que os recebe. De notar que isto é independente do esquema de endereçamento, sendo que também o endereçamento geográfico pode ser usado em *unicast*. Em *multicast*, existe apenas um veículo que envia a informação mas podem existir vários veículos a receber essa informação. O emissor geralmente não sabe quantos receptores existem, apenas sabe que vai enviar os dados para um grupo específico. Em redes veiculares, existem muitas aplicações relacionadas com a segurança pública que requerem que os dados sejam enviados, por exemplo, para todos os veículos numa área específica, que sigam numa direcção específica, o que corresponde a um grupo *multicast*. Em *broadcast*, os dados devem ser enviados para todos os veículos. De qualquer das formas, uma vez que as redes veiculares

podem estar espalhadas por todos os continentes, o *broadcast* geralmente é utilizado apenas para uma determinada área designada por zona de relevância (*Zone of Relevance - ZOR*) [13].

2.2.4.4 Tecnologias de Acesso à Rede

Hoje em dia, existem diversas normas de comunicação que podem ser usadas para acesso à rede pelas aplicações das redes veiculares. Todas essas normas têm vantagens e desvantagens dependendo do tipo de aplicação e dos cenários considerados. Nos sistemas de comunicação veiculares é esperado que os efeitos de desvanecimento rápido e lento originem problemas nos canais de rádio uma vez que, quer o transmissor, quer o receptor estão em movimento, possivelmente um em direcção ao outro.

O IEEE 802.11 é actualmente a norma mais utilizada para redes de área local sem fios. Deste modo, não é surpresa nenhuma que, também nas redes veiculares, o 802.11 seja a tecnologia de acesso à rede que mais frequentemente se utilize. Contudo, como se pode ver em [14], foi mostrado que, com modelos de propagação reais, o BER (bit-error rate) do 802.11 pode ser muito alto impondo desafios significativos às camadas mais altas. O problema pode ser atribuído ao desenho da 802.11a que foi optimizado para redes de área local com mobilidade reduzida, ou mesmo sem mobilidade. No entanto, em redes veiculares as velocidades são elevadas e as técnicas de equalização, que foram projectadas para velocidades mais baixas, mal conseguem lidar com as condições resultantes do *fast fading* (desvanecimento rápido). Foi devido a isto que se desenvolveu a nova norma 802.11p que tem vindo a ser utilizada actualmente.

A norma IEEE 802.11p tem por base sistemas IEEE 802.11, no entanto a versão “p” é destinada a comunicações entre veículos e entre estes e infra-estruturas fixas. Esta nova tecnologia usa a banda dos 5.9 GHz nos mais variados ambientes de propagação: veiculares, abertos, urbanos, etc. Grande parte das características desta norma são idênticas à da norma IEEE 802.11a.

De seguida apresentar-se-ão algumas características desta norma:

Parâmetros	IEEE 802.11p
<i>Bit Rate (Mbit/s)</i>	3; 4.5; 6; 9; 12; 18; 24; 27
<i>Symbol Duration</i>	8 μ s
<i>Guard Time</i>	1.6 μ s
<i>FFT Period</i>	6.4 μ s
<i>Preamble Duration</i>	32 μ s
<i>Subcarrier Spacing</i>	0.15625 MHz

Tabela 1, Características da norma IEEE 802.11p

A norma IEEE 802.11p apresenta uma maior robustez relativa ao *fading* (desvanecimento do sinal) permitindo um maior alcance, com menos perdas, acabando por beneficiar as aplicações de segurança em que o que importa mais é o alcance e não tanto a quantidade de informação.

2.2.4.5 Geocasting

O tipo de Encaminhamento *multicast* baseado na posição dos veículos, também designado por geocasting [15], é adequado para uma série de aplicações. No geocasting, todos (ou alguns) veículos localizados numa certa área devem receber dados. A decisão sobre que veículos devem receber os dados não é baseada nos seus endereços, mas sim noutra tipo de métricas tais como a localização, a direcção ou a velocidade usadas.

O geocasting é baseado num *broadcast* selectivo, o que pode ser uma boa solução no sentido de ter atrasos baixos nas aplicações de segurança pública, por exemplo. Este mecanismo usa o *flooding* (inundação) sobre a camada MAC. Contudo, devido ao esquema de *flooding* puro podem ocorrer facilmente situações que resultam em problemas, tais como o “*broadcast storm*” [16] que ocorre em redes com uma densidade elevada de veículos. Dessa forma, em horas de ponta nas auto-estradas, que são horas que representam exactamente essa densidade elevada de veículos que origina problemas com o *flooding* de dados, é usado um mecanismo de encaminhamento inteligente de pacotes. Basicamente, cada veículo toma uma decisão local de envio da mensagem, sendo que o objectivo passa por minimizar o número de retransmissões desnecessárias de dados. Os veículos mais próximos da fonte podem cancelar o encaminhamento no caso de ouvirem outro veículo que esteja mais afastado a fazer retransmissão dos dados. Este esquema de *broadcast* selectivo ganhou muita atenção e muitas variantes destes esquemas têm sido propostas. Mais à frente aprofundar-se-á este tipo de encaminhamento.

2.2.5 Desafios técnicos

Tal como foi referido anteriormente existem uma série de desafios técnicos que necessitam de ser ultrapassados de modo a permitir a implantação dos serviços de redes veiculares em larga escala. De uma forma geral, a escalabilidade e a interoperabilidade são duas questões importantes que necessitam de ser resolvidas. Os protocolos e mecanismos utilizados têm de ser escaláveis a um grande número de veículos e devem operar com diferentes tecnologias sem fios.

2.2.5.1 Comunicação confiável e Protocolos MAC

De uma forma similar às redes *ad hoc*, as redes veiculares experienciam comunicações de múltiplos saltos que podem, potencialmente, estender a infra-estrutura fixa do operador de rede e, assim, fornecer infra-estruturas virtuais entre os veículos em movimento, ou seja, a comunicação deixa de poder ser feita apenas com a intermediação de infra-estruturas e passa a ser feita veículo a veículo.

De facto, as comunicações de múltiplos saltos sem fios representam um grande desafio na fiabilidade das comunicações. Consequentemente, são necessários protocolos MAC eficientes enquanto existe uma adaptação à dinâmica elevada dos ambientes das redes veiculares e se consideram mensagens prioritárias de algumas aplicações (como por exemplo, avisos de acidente). Apesar da dinâmica da topologia e da alta mobilidade, a associação rápida e a baixa latência de

comunicação entre veículos que comunicam entre si devem ser satisfeitas no sentido de garantir o seguinte:

- Fiabilidade do serviço para aplicações relacionadas com a segurança, tendo em conta a sensibilidade do tempo enquanto se transfere a mensagem;
- A qualidade e a continuidade do serviço para aplicações não relacionadas com a segurança.

Além disso, os protocolos MAC devem ter em consideração todo o tipo de comunicações heterogéneas que são susceptíveis de ocorrer entre diferentes tecnologias sem fios (por exemplo, Wi-Fi e GSM) em redes veiculares.

2.2.5.2 Encaminhamento e Disseminação

As redes veiculares diferem das redes *ad hoc* sem fios convencionais, não só por experienciarem rápidas alterações nas ligações sem fios, mas também por terem de lidar com diferentes tipos de densidades de veículos que constituem as redes [17]. Por exemplo, as redes veiculares em auto-estradas ou em áreas urbanas têm mais tendência em formar redes com elevadas densidades de veículos durante as horas de ponta. Por outro lado, em meios rurais, cuja população é reduzida, as redes veiculares têm tendência a serem formadas por uma densidade de veículos menor, experimentando, frequentemente, situações de fragmentação da rede em virtude desse número reduzido de veículos. Também os cenários urbanos e de auto-estrada experimentam situações de fragmentação da rede durante a noite.

Além disso, é expectável que as redes veiculares lidem com um vasta gama de aplicações que vão desde a segurança ao lazer. Desse modo, os algoritmos de encaminhamento e de disseminação devem ser eficientes e devem adaptar-se às características das redes veiculares e das aplicações, permitindo diferentes prioridades de transmissão de acordo com o tipo de aplicações (sejam elas de segurança ou não). Grande parte da investigação a nível de redes veiculares esteve focada em analisar algoritmos de encaminhamento que conseguissem lidar com o problema de “*broadcast storm*” em topologias de rede com elevadas densidades [14], [18], assumindo que as redes veiculares são redes bem ligadas por natureza. Até agora, a penetração das redes veiculares é um pouco baixa e, dessa forma, as redes necessitam da existência de infra-estruturas de suporte para implantação em larga escala que possam fazer retransmissão dos pacotes sempre que houver uma menor densidade de veículos. Deste modo, no futuro, é esperado que estas redes tenham uma maior penetração, com um menor número de infra-estruturas de suporte e, assim, é importante neste caso considerar o problema das redes desligadas. Este é um desafio de investigação no desenvolvimento de protocolos de encaminhamento que garantam uma comunicação fiável e eficiente que possa suportar uma grande diversidade de topologias de rede.

No que diz respeito à disseminação de mensagens, os algoritmos de disseminação devem depender da densidade da rede, bem como do tipo de aplicação. Por exemplo, a disseminação de mensagens em aplicações relacionadas com a segurança devem ser do tipo *broadcast*, de modo a assegurar que a mensagem se propaga até ao *cluster* de veículos pretendido, sem causar o já falado “*broadcast storm*”. Em aplicações que não estão relacionadas com a segurança, a mensagem

deve ser transmitida em *unicast* ou *multicast* pois esse tipo de transmissão é mais adequado ao serviço em si.

Mais à frente falaremos com mais detalhe sobre os diferentes tipos de protocolos de encaminhamento existentes em redes veiculares devido à relevância que este aspecto tem para esta Dissertação.

2.2.5.3 Segurança

A segurança na comunicação de redes veiculares é um grande desafio que tem um papel muito importante no desenvolvimento e aplicação de redes veiculares. De facto, a segurança e a privacidade são as maiores preocupações no desenvolvimento e na aceitação dos serviços, pelo que a segurança não deve ser posta em causa pela facilidade que existe de uso dos protocolos para descoberta de serviços.

Como a procura por mecanismos de descoberta de serviços está a crescer, os passageiros podem usar serviços em redes “exteriores” e criar imensos problemas de segurança para eles próprios e para os outros utilizadores da rede. Consequentemente, é importante propor soluções inovadoras para se estabelecer uma comunicação segura entre os participantes, bem como um acesso seguro e autorizado aos serviços.

Para melhorar o acesso das redes veiculares, estas soluções devem aproveitar:

- I. Conceito de autenticação e comunicação das redes *ad hoc* de múltiplos saltos em que, por um lado, se permitem comunicações seguras e, por outro lado, se estende a cobertura das infra-estruturas possibilitando uma distribuição mínima das mesmas, reduzindo assim o custo de implementação ao operador de rede;
- II. Autenticação baseada na distribuição. As arquitecturas de segurança apropriadas devem proporcionar a comunicação entre veículos e permitir diferentes serviços de acesso.

Devem ser desenvolvidos um conjunto de mecanismos de segurança adequados para qualquer ambiente de redes veiculares que proporcionem confiança, autenticação, controlo de acesso e um serviço de acesso seguro com autorização. Neste contexto, a optimização da autenticação é importante para ser estudada, quer para as comunicações com frequente recurso a infra-estruturas, quer sem esse recurso, com o objectivo de facilitar o processo de reautenticação que tem grandes possibilidades de ocorrer durante a mobilidade dos veículos.

Além disso, o comportamento de cada nó é uma questão importante que pode ameaçar a segurança da comunicação, assim como a prestação de serviços em redes veiculares, pelo que é um aspecto que merece consideração. Devido ao ambiente aberto e dinâmico das redes veiculares, a cooperação dos nós é um aspecto importante que deve ser satisfeito para permitir que as comunicações entre os veículos sejam feitas com sucesso. Em determinadas situações, os nós podem-se comportar de uma forma egoísta, não fazendo encaminhamento das mensagens no sentido de poupar energia e largura de banda, ou simplesmente devido a preocupações com a

segurança e com a prioridade. Por consequência, devem ser desenvolvidos mecanismos apropriados para detectar o egoísmo de determinados nós e fazê-los cooperar com os restantes nós da rede, caso contrário as políticas de segurança de rede podem contribuir negativamente para a conectividade da rede.

2.2.5.4 Configuração de IP e Gestão de Mobilidade

O potencial da arquitectura V2I (comunicação veículo - infra-estrutura) é promissor em permitir o acesso dos veículos à Internet, bem como a prestação de serviços relacionados com a Internet a condutores e passageiros. Contudo, existem dois desafios técnicos sobre esta questão: a configuração do endereço IP e a gestão da mobilidade. Estes desafios podem ameaçar a qualidade e a continuidade dos serviços.

Observando as características das redes veiculares, a configuração do endereço IP deve ser feita de uma forma automática e distribuída. Até ao momento, não existe nenhum padrão para a autoconfiguração em redes *ad hoc* e, deste modo, o problema torna-se complexo para as redes veiculares.

Em virtude disso, existe um trabalho considerável em desenvolvimento por organismos de normalização no sentido de resolver este problema. Além dos esforços do IETF (*Internet Engineering Task Force*) através da *Autoconf WG* para o desenvolvimento de soluções IPv6 para redes *ad hoc*, onde se incluem as redes veiculares, todos os *comités* internacionais definem arquitecturas para a comunicação veicular com uma camada protocolar (*stack*) nativa de IPv6 incluída nos seus protocolos de *stack*.

Em relação à gestão de mobilidade, este é um problema crucial para as aplicações que não estão relacionadas com segurança onde o envio dos dados não é feito por *broadcast*. Na verdade, a ausência de um mecanismo de gestão de mobilidade ameaça a comercialização deste serviço nas redes veiculares e assim perde-se o benefício da arquitectura V2I já que todos os serviços relacionados com a Internet não iriam garantir nem qualidade de serviço nem a sua continuidade.

2.2.6 Evolução e Progresso

2.2.6.1 Actores Principais

As redes veiculares apresentam um campo de investigação, desenvolvimento, normalização e de testes no terreno muito activo. Por todo o mundo existem muitos projectos internacionais e nacionais levados a cabo por acções governamentais, pela indústria ou mesmo por instituições académicas direccionadas para estas redes. Esse tipo de projectos inclui consórcios como:

- *Vehicle Safety Consortium* (VSC – E.U.A); [19]
- *Collision Avoidance Metrics Partnership* (CAMP, E.U.A.); [20]
- *Car 2 Car Communication Consortium* (C2C-CC – Europa); [11]

- *Advanced Safety Vehicle* (ASV Program – Japão);
- Uma série de esforços de normalização e testes no terreno como o *large-scale Vehicle Infrastructure Integration Consortium* (VIIC – E.U.A.).

As aplicações alvo nos E.U.A. estão relacionadas com a segurança, eficiência de tráfego, pagamentos automáticos de portagens (*electronic toll collect* – ETC) e na gestão do relacionamento com o cliente (CRM). Por outro lado, na Europa, são esperadas menos infra-estruturas do que nos Estados Unidos pelo que, consequentemente, as aplicações alvo são apenas a segurança e a eficiência do tráfego. Neste contexto, foi iniciada uma organização sem fins lucrativos, designada de *Car 2 Car Communication Consortium* (C2C-CC), cuja origem, como já foi referido, foram os seis construtores de automóveis Europeus (Audi, BMW, DaimlerChrysler, Fiat, Renault e Volkswagen). Esta organização tem como objectivo desenvolver uma norma industrial aberta para a comunicação entre veículos para garantir a interoperabilidade dos veículos na Europa, usando uma tecnologia LAN Sem fios (WLAN IEEE 802.11 standards).

Além disso, os operadores de telecomunicações, devido ao facto de possuírem um grande número de infra-estruturas implantadas, também dão uma atenção particular ao desenvolvimento das redes veiculares. Orange Labs [21], Telecom Italia [22], AT&T labs [23] ou Deutsche Telekom [24] fazem parte do desenvolvimento da tecnologia através de parcerias com empresas, universidades ou através das suas próprias equipas de investigação. De facto, estas empresas vêem estas redes como uma evolução natural ou extensão dos actuais sistemas sem fios através de uma solução com custos reduzidos que melhora o desempenho das redes de telecomunicações ultrapassando as limitações de usar uma tecnologia de múltiplos saltos e oferecendo a hipótese de uma nova oportunidade de negócio (que passa não só pela captura de novos clientes como, também, pela tentativa de conseguir a lealdade dos clientes já existentes).

Muitas indústrias e companhias envolvidas nos consórcios mencionados acima estão a investir grandes quantias no desenvolvimento de novas soluções de sistemas de transporte inteligentes. Algumas delas (tais como a Google [25] e a TomTom [26]) estão interessadas, em particular, em ‘infotainment’ (informação + entretenimento) em tempo real, assim como em desenvolver ferramentas de gestão de tráfego e de suporte de caminhos alternativos para os utilizadores. Estas empresas fazem muito mais do que simplesmente oferecer a visualização gráfica sobre o caminho a seguir:

- Permitem que os condutores e os passageiros recebam informações sobre o trânsito em qualquer momento;
- Permitem que os utilizadores se liguem à Internet;
- Possibilitam a recepção de outro tipo de informações que podem ser úteis (tais como a próxima bomba de gasolina, ou o próximo restaurante, ou o próximo cinema, etc).

Outro exemplo de uma empresa empenhada no desenvolvimento de redes veiculares é o da Microsoft que, inclusive, propôs aos construtores de automóveis e aos seus apoiantes uma nova versão do seu sistema operativo, capaz de gerir todos os sistemas que existem nos veículos [27].

Por ser uma tecnologia em constante desenvolvimento, as redes veiculares continuam a ser uma das principais áreas de investigação. Um grande número de conferências e *workshops* têm abordado este tema, e uma série de universidades e institutos de investigação têm batalhado no sentido de ultrapassar diversos desafios encontrados, tais como o encaminhamento e a disseminação de dados, PHY/MAC, segurança, auto-organização, etc.

2.2.6.2 Normalização das actividades principais

Em 1999, a *U.S. Federal Communication Commission* alocou 75 MHz do espectro de comunicação dedicado de curto alcance (DSRC) a 5.9 GHz (5.850-5.925 GHz) para ser usado exclusivamente pelas comunicações V2V e V2I na América do Norte. O principal objectivo era possibilitar aplicações públicas de segurança que podem salvar vidas, assim como melhorar o fluxo de trânsito. Serviços privados também são permitidos no sentido de minimizar os custos e encorajar o desenvolvimento e adopção do DSRC.

No Japão, a banda de frequência alocada do DSRC foi dos 5.770 aos 5.850 GHz.

O espectro DSRC está dividido em 7 canais de 10 MHz. O canal 5885-5895 MHz é o canal de controlo que, geralmente, é restrito apenas a comunicações de segurança. Os dois canais que delimitam o espectro estão reservados para os avanços futuros a nível de aplicações para evitar acidentes e para aplicações públicas de segurança de alta potência. Os restantes canais são canais de serviço e estão disponíveis quer para aplicações de segurança, quer para os restantes tipos de aplicações.

Na Europa, um dos obstáculos à adopção de VANETs, no sentido de aumentar a segurança das estradas, está relacionado com a escassa frequência de espectro dedicada. Comparando com a América do Norte e o Japão, o processo para alocação de frequência é consideravelmente mais complexo e demorado, uma vez que todos os países Europeus e as suas respectivas autoridades estão envolvidos. As medidas mais importantes, tomadas após alguns anos de trabalho na regulamentação e redistribuição, são análises das necessidades do espectro, o pedido para o espectro proposto, o estudo de aspectos de compatibilidade e a recomendação de políticas de utilização do espectro harmonizado. A decisão da Comissão Europeia em designar o espectro foi tomada, e este foi alocado em Agosto de 2008: está disponível a largura de banda dos 5875-5905 MHz para aplicações de segurança na estrada (com uma possível extensão de 20 MHz no Futuro), e uma largura de banda dos 5855-5875MHz para aplicações que não estão relacionadas com a segurança. A alocação de 50Mhz de frequência em conjunto com a possibilidade de expansão em 20 Mhz torna a alocação de espectro Europeia semelhante à alocação de 75Mhz existente na América do Norte.

2.2.7 Protocolos de Encaminhamento

Como se sabe, é impossível, sem os protocolos de encaminhamento instalados nos veículos, ter sucesso no envio de dados em redes veiculares. Desta forma, o desenvolvimento de protocolos de encaminhamento acaba por ser uma das áreas em que existe um maior foco de inves-

tigação e desenvolvimento, no sentido de haver uma adaptação desses protocolos às características especiais das redes veiculares.

Em primeiro lugar, vão ser apresentados os protocolos de encaminhamento mais apropriados para MANETs (que são constituídas por nós com uma mobilidade claramente inferior em relação às VANETs) mas que podem ser adaptados a VANETs, com consequente diminuição na eficácia.

Em virtude da mobilidade dos nós, em ambos os tipos de rede falados em cima, a topologia da rede sofre constantes alterações, o que pode tornar complicada não só a descoberta de uma rota desde o nó de origem, até ao nó de destino, como também a manutenção dessas mesmas rotas. Para fazer frente a estes problemas, diversos protocolos de encaminhamento têm sido desenvolvidos. Esses protocolos dão pelo nome de “*topology based routing*” pois são protocolos dependentes da topologia da rede e, dentro desse tipo de protocolos, temos os protocolos proactivos (OLSR, por exemplo) e os reactivos (AODV, por exemplo).

As redes veiculares, VANETs, herdaram as mesmas características que as MANETs. Devido à alta mobilidade da rede, às frequentes alterações da topologia dessa mesma rede e ao tempo de vida limitado das rotas, por exemplo, as decisões de encaminhamento em redes veiculares tornaram-se bastante complicadas. Outros factores, tais como o tipo de estrada e os diferentes ambientes (urbano ou auto-estrada) tornam ainda mais desafiante estudar o tipo de encaminhamento a aplicar neste tipo de redes [28].

Ao contrário do que acontecia com o tipo de encaminhamento baseado na topologia, apropriado para MANETs, o tipo de encaminhamento baseado na posição de cada veículo, apropriado para VANETs, usa informações sobre a posição dos nós que participam nas comunicações.

2.2.7.1 Protocolos de encaminhamento ad hoc

Nesta secção são abordados os dois protocolos de encaminhamento mais comuns em redes *ad hoc*, nomeadamente o OLSR e o AODV, com base em [29], [30], [31], [32], [33], [34].

2.2.7.1.1 OLSR

✓ Descrição

O OLSR é um protocolo de encaminhamento proactivo, isto é, é um protocolo de encaminhamento que troca regularmente informações sobre a rede com os restantes nós de modo a actualizar a sua tabela de encaminhamento e a possibilitar que todos os nós construam, e mantenham, um mapa virtual da conectividade da rede. O OLSR é um protocolo de encaminhamento do tipo “*link-state*”.

Um protocolo de encaminhamento do tipo “*link-state*” é um protocolo realizado por todos os nós que se movem na rede. De uma forma simples, o seu funcionamento é o seguinte: todos os nós da respectiva rede constituem/constroem um mapa da conectividade da rede, mos-

trando quais os nós que se encontram desligados entre si, resultando isso numa “imagem virtual” da topologia da rede. Para além disso, cada nó calcula, independentemente, o melhor caminho lógico entre ele mesmo e os possíveis destinos na rede. A colecção desses caminhos acaba por formar a tabela de encaminhamento de cada nó. Ao contrário do que se passa com um protocolo de encaminhamento “*distance-vector*” em que cada nó partilha a sua tabela de encaminhamento com os seus vizinhos, num protocolo “*link-state*” a única informação passada entre os nós está relacionada com a conectividade.

Depois desta breve explicação, já é possível perceber melhor o funcionamento do OLSR. Este, usa as mensagens de “*Hello*” e “*Topology Control (TC)*” para descobrir e disseminar a informação de cada ligação da rede. Dessa forma, cada nó vai usar essa informação, acerca da topologia da rede, para calcular o destino do próximo salto, usando o caminho que envolve um menor número de saltos.

Especificando um pouco melhor a troca de mensagens que ocorre, o OLSR faz uso das mensagens de “*Hello*” para encontrar os seus vizinhos a um, e a dois saltos de distância através das respostas a essas mensagens. Dessa forma, o nó que envia os pacotes pode seleccionar o seu *Multipoint Relay* (MPR) baseado no nó que, situado a um salto de distância, oferece uma melhor rota para os nós localizados a dois saltos de distância. Cada nó tem também um campo (“*MPR selector set*”) que enumera os nós que o tiverem eleito como um nó MPR. O OLSR usa as mensagens de controlo da topologia (“*TC messages*”), juntamente com o encaminhamento dos MPRs para disseminar as informações acerca dos vizinhos para toda a rede. O MPR é o que distingue o OLSR dos restantes protocolos de encaminhamento proactivos.

De modo a tornar possível, de uma forma mais simplificada, a percepção do funcionamento desta técnica, começar-se-á por clarificar o funcionamento de uma rede *ad hoc*, sem o uso do OLSR. Nessa situação, quando um nó recebe um pacote de controlo, acaba por retransmitir essa informação para todos os seus vizinhos levando ao acontecimento de um fenómeno denominado por *flooding* (“inundação”), uma vez que todos os nós recebem pacotes. O que vai acontecer, com este método, é que cada nó acabará por receber diversas vezes o mesmo pacote, proveniente de nós vizinhos distintos, levando ao sobre carregamento da rede com informações redundantes, gerando um *overhead* elevado.

A Figura 5 acaba por demonstrar isso mesmo, isto é, o nó N envia a informação para todos os vizinhos. Ignorando as ligações a negrito que, para esta explicação, sem o OLSR, têm o mesmo significado que as restantes, todos os nós que recebem a informação do nó central acabam por retransmitir para os seus vizinhos a um salto de distância, acabando esses vizinhos por receber o mesmo pacote, mais do que uma vez, de diferentes nós. Este processo vai-se repetir nos próximos saltos e todos os nós vão acabar por receber pacotes num fenómeno que representa a tal “inundação”, originando uma sobrecarga na rede em que esta fica, literalmente, inundada com informações redundantes.

Com o funcionamento do OLSR, o número de nós que retransmite esses pacotes é limitado, reduzindo/eliminando assim o problema de *overhead* elevado. O seu funcionamento é o seguinte: entre os nós que constituem a rede, haverá aqueles que serão designados como os tais MPR (representados a cinzento na figura). Essa escolha do MPR é feita por consenso entre os nós vizinhos localizados a um salto de distância. Dessa forma, depois de eleito o MPR, cada vez que uma informação deve ser actualizada na rede, os pacotes enviados por um nó chegarão a todos os

vizinhos, mas somente o MPR pode retransmitir essa informação, fazendo com que os nós seguintes apenas recebam a informação uma vez.

Com esta medida vai-se reduzindo a chegada de pacotes redundantes e eliminando o *overhead* pois, como se pode ver pela figura, existem menos caminhos na rede percorridos pelos pacotes de actualização (ligações representadas a negrito na figura).

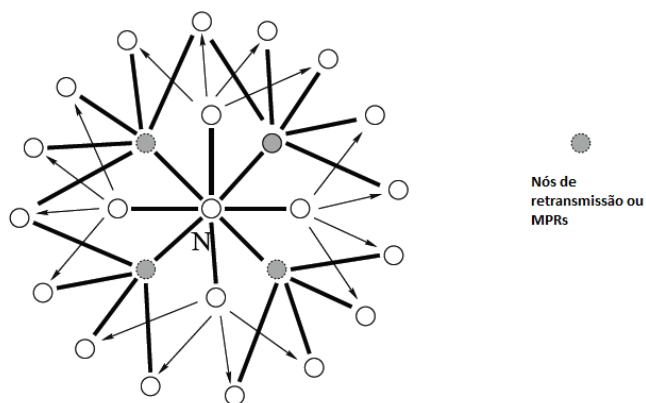


Figura 5, Multipoint Relay [31]

O OLSR é, então, um modo mais organizado e eficiente para gerir o tráfego de pacotes de controlo entre dois nós, procurando sempre o caminho mais curto. Esse cálculo é feito de acordo com um algoritmo que geralmente resulta de uma variação do algoritmo de *Dijkstra*.

✓ Vantagens

As vantagens deste protocolo passam pelo facto de, por ser um protocolo proactivo, todas as rotas para os destinos dentro da rede são conhecidas e mantidas, mesmo antes do seu uso (criando a tal “imagem virtual” da rede). A existência dessas rotas acaba por ser favorável para muitas situações, uma vez que se evita o atraso associado à procura de uma rota para o destino.

Outro facto de realce é que o *overhead* gerado pelo encaminhamento, que geralmente é superior aos protocolos reactivos devido à necessidade de manter sempre as rotas para todos os destinos (exigindo assim uma troca superior de mensagens de controlo), não aumenta com o número de rotas a ser utilizado.

✓ Desvantagens

O OLSR também apresenta problemas. Um dos inconvenientes deste protocolo prende-se com o facto de este não dispor de qualquer método para a detecção da qualidade da ligação. O que é feito, é simplesmente assumir que uma ligação está “up” se tiverem sido trocados recentemente um número razoável de pacotes de “Hello”. Isto pressupõe que as ligações são bi-modais (ou funcionam ou não), o que acaba por não ser, necessariamente, o caso em redes sem fios, onde as ligações muitas vezes apresentam taxas intermédias de perdas de pacotes.

2.2.7.1.2 AODV

O protocolo AODV é um protocolo que foi elaborado com o intuito de se adaptar a cenários de alta mobilidade, cujo objectivo passava por, ao contrário do que se passa com o OLSR, minimizar o desperdício de banda e minimizar o processamento nos nós (neste caso veículos, que acabam por funcionar como *routers* nestes cenários de redes veiculares). O AODV utiliza tabelas de encaminhamento tradicionais, isto é, tabelas que apenas armazenam o próximo salto para o nó destino em questão.

Visto que se trata de um protocolo reactivo, cada vez que se pretende enviar pacotes para um nó que não conste, na altura, na tabela de encaminhamento do nó fonte, inicia-se um processo de descoberta de rotas, baseado na origem. Essas rotas são mantidas enquanto o nó de origem de envio da informação necessitar delas.

O funcionamento dessa descoberta e a manutenção dessas rotas baseia-se na troca de mensagens de requisição de rota (*Route Request – RREQ*), na resposta a essa requisição de rota (*Route Reply – RREP*) e no aviso de quebra das ligações (*Route Error – RERR*). É através das trocas destas mensagens via *User Datagram Protocol (UDP)*, pela porta 654, que é construída então a tabela de encaminhamento de cada nó.

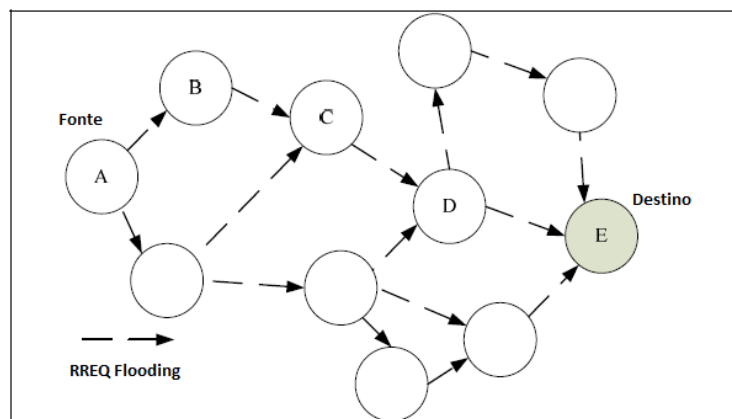


Figura 6, RREQ flooding [35]

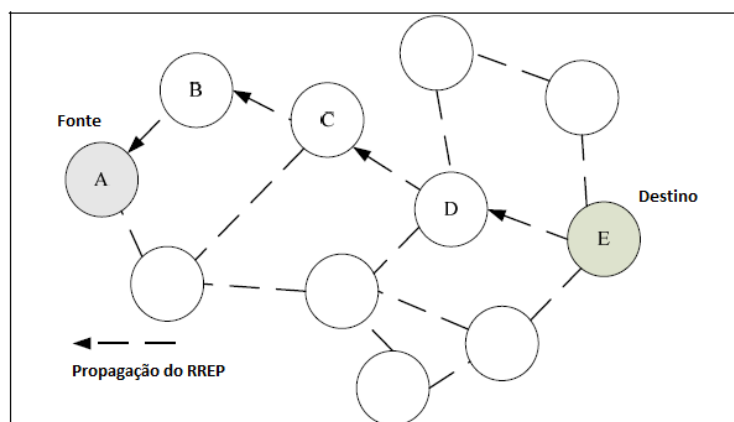


Figura 7, Propagação do RREP [35]

Detalhando um pouco mais o funcionamento do protocolo, inicialmente, quando o nó de origem pretende um caminho para determinado destino e, naquele momento, não tem uma rota válida para esse destino, então inicia-se a descoberta de um caminho. O nó de origem vai então enviar para os seus vizinhos um pacote de RREQ, como se pode ver na Figura 6, e estes, por sua vez, vão enviar também para os seus próprios vizinhos esse pacote, e assim sucessivamente, até que seja atingido o nó destino, ou até que algum dos nós tenha uma rota válida para o destino.

Este protocolo utiliza um *sequence number* do destino para ter a certeza que todas as rotas estão livres de ciclos e que todas as rotas possuem as informações para o destino o mais actualizadas possível. Todos os nós mantêm também o seu próprio *sequence number* assim como um *broadcast ID* que é incrementado cada vez que é realizado um RREQ. Para além do próprio *sequence number*, do *broadcast ID* e do *sequence number* do destino, já citados, o pacote de RREQ possui, também, um *broadcast identifier* e o campo *time-to-live*. Desta forma, no caso de um nó intermédio possuir uma rota para o destino, este apenas responderá ao RREQ se o *sequence number* do destino for maior ou igual ao contido no RREQ.

Durante o processo de envio de um RREQ, um nó intermédio armazena na sua tabela de encaminhamento o endereço dos vizinhos, estabelecendo assim um caminho contrário. Deste modo, se um RREQ chegar novamente a esse nó (por outro caminho) será, então, descartado prevalecendo o que chegou primeiro.

A partir do momento em que o pacote RREQ atinge o seu destino, ou algum nó que tenha um caminho para esse destino, é enviado para a fonte via *unicasting* um pacote de RREP, como se pode ver pela Figura 7.

Sempre que uma rota é armazenada na tabela de encaminhamento, é-lhe associado um tempo de vida, findo o qual, no caso de a rota não ter sido utilizada, esta é excluída da tabela.

Em caso de haver uma movimentação do nó fonte dentro da rede (o que em redes veiculares é inevitável) ele estará apto a enviar de novo um pacote de RREQ para descobrir uma nova rota para o destino. Já no caso de ser um dos nós intermédios a movimentar-se, este deverá enviar uma notificação aos seus vizinhos de quebra de ligação (RERR) informando assim que esta parte da rota deve ser excluída. Os vizinhos, por sua vez, vão propagar a notificação de quebra de ligação até que o nó fonte seja informado sobre a falha e possa reenviar um novo RREQ. Existe, periodicamente, um envio de pacotes de “Hello” de forma a verificar se existe ruptura nas rotas, o que é bastante importante e dá pelo nome de manutenção de rotas.

✓ Vantagens

A grande vantagem deste protocolo de encaminhamento resulta do facto de as rotas serem estabelecidas “on demand” (diminuindo, assim, o desperdício de banda e minimizando o processamento nos nós) e, também, do facto de o *sequence number* do destino ser usado para encontrar a última rota para o destino

✓ Desvantagens

Como desvantagem principal, este protocolo apresenta um atraso causado pelo processo de descoberta de rotas que pode ser significativo para determinadas aplicações.

2.2.7.2 Protocolos de encaminhamento baseados na posição

Como já foi referido, a elevada mobilidade dos nós nas redes veiculares, onde os nós variam frequentemente a sua posição, exige o recurso a protocolos de encaminhamento que consigam lidar com este tipo de ambientes.

Estas exigências fazem com que alguns protocolos utilizem as posições dos nós, no sentido de proporcionar comunicações de sucesso entre o veículo-fonte e o veículo-destino. Tal método, em que as posições geográficas dos nós são usadas para se conseguir, com o auxílio dos protocolos de encaminhamento, enviar dados da origem ao destino, é designado por “*Position based routing*”.

O encaminhamento baseado na posição assume que cada nó tem conhecimento sobre a sua posição física/geográfica através do GPS, por exemplo. Para além da sua posição, cada nó também tem a noção da posição do veículo-fonte, do veículo-destino, assim como dos seus vizinhos. Comparando este tipo de encaminhamento com o mencionado anteriormente, baseado na topologia, agora utilizam-se informações adicionais de cada nó que podem ser usadas em redes veiculares e que são fornecidas, por exemplo, pelo GPS.

Este tipo de encaminhamento proporciona comunicações salto a salto nas redes veiculares e é baseado em diferentes conceitos como “*beaconing*”, “*location service and servers*” e “*recovery and routing strategies*” [36], [37].

- **Beaconing:** Um nó faz encaminhamento de um pacote com a sua posição física actual e com um único ID (endereço de IP). Se um nó receber um *beacon* de um vizinho, então actualiza essa informação na sua tabela de localização. Desta forma, o *beaconing* é usado para reunir informações dos seus vizinhos a um salto ou dos seus vizinhos mais próximos;
- **Location service and servers:** Quando um determinado nó não contém a informação acerca da posição física actual de um nó específico na sua tabela de localização, ou quer saber a posição física actual de um certo nó, então o serviço de localização possibilita que se encontre essa tal posição [37]. Para traçar a posição actual do nó desejado, o nó que pretende saber essa posição envia um pedido de localização com o IP do nó do qual deseja saber a posição, com um *sequence number* e com o número total de saltos. Os vizinhos continuam o envio da mensagem até encontrarem o nó pretendido que, assim que é encontrado, responde com a sua posição física actual. Desta forma, o nó original que enviou o pedido de informação pode actualizar a sua tabela de localização.
- **Recovery and forwarding strategies:** esta estratégia é usada para fazer encaminhamento dos dados desde a fonte até ao destino. Os protocolos de encaminhamento baseados na posição usam três tipos de métodos para fazerem encaminhamento dos pacotes:

1. “*Restricted directional flooding*”;
2. “*Hierarchal forwarding*”;
3. “*Greedy forwarding*”. [38]

O primeiro caso acontece quando os pacotes de dados são enviados para uma área geográfica de um determinado nó, em que essa área é conhecida como “*forwarding zone*”. Este método não requer informação dos nós vizinhos. Essa “*forwarding zone*” é criada entre a fonte e o destino e o nó fonte faz *flooding* do pacote para essa zona, no sentido de enviar os pacotes em direcção ao destino. Em virtude deste método, podemos estar perante uma situação de *overhead* elevado, se um grande número de pacotes for enviado para essa área pelo nó de origem, o que pode resultar na expansão da área de encaminhamento. Esses problemas podem ser ultrapassados adoptando um método de *flooding* inteligente tal como o “*Distance-aware-timer-based Suppression method*” [39]. O *Restricted directed flooding* usa protocolos baseados em *broadcast* como o “*Mobility-centric data dissemination algorithm for vehicular networks*” (MDDV) [40].

Uma outra estratégia de encaminhamento é o “*hierarchal forwarding*”, em que a hierarquia do protocolo é usada para enviar os pacotes em diferentes passos. Este realiza o encaminhamento para os nós vizinhos e também para nós a maiores distâncias. A estratégia de encaminhamento para este método passa por usar “*geodesic packet forwarding*” (GPF).

Por fim, o último método de encaminhamento de pacotes é o “*greedy forwarding*” em que um nó envia a informação para nós próximos do destino. O nó que vai enviar os pacotes calcula o número mínimo de saltos para enviar os pacotes para o destino. Nos casos em que ocorra algum tipo de falha por não haver nenhum nó próximo do destino é usada uma estratégia de recuperação para ultrapassar esta situação. Um exemplo de um método para ultrapassar esse problema é o “*Greedy perimeter stateless routing*”. [38]

Ao contrário do que acontece no tipo de protocolos de encaminhamento baseados na topologia, os protocolos de encaminhamento baseados na posição não precisam de manter nenhuma rota. A rota é determinada apenas quando for necessária para ser enviado o pacote. Uma outra vantagem é o facto de os protocolos de encaminhamento baseados na posição conterem informações sobre a fonte, o destino e os vizinhos [23]. Sendo assim, como se pode concluir, este tipo de encaminhamento é claramente mais apropriado para VANETs. Muitos protocolos de encaminhamento que usam as informações dos nós para tomar decisões de encaminhamento têm sido propostos por muitos investigadores. Embora esses protocolos de encaminhamento sejam mais adequados para redes veiculares, ainda têm alguns desafios a ultrapassar.

De seguida, vamos mencionar alguns dos protocolos mais recentemente apresentados, sem abordar o seu funcionamento pois o âmbito desta Dissertação não foca os protocolos de encaminhamento. No entanto, quisemos demonstrar que existe um tipo de protocolos de encaminhamento apropriado para redes veiculares, apresentando-os, fazendo um ponto de situação e dando alguns exemplos, tais como:

- ✓ “*Greedy Perimeter Stateless Routing*” (GPSR) [41]. Um exemplo onde foi apresentado este protocolo pode ser visto em [42];

- ✓ “Geographic Source Routing” (GSR) [42];
- ✓ “Anchor-based Street and Traffic Aware Routing” (A-STAR) [43]. Um exemplo onde foi proposto este protocolo pode ser visto em [44]. Este protocolo foi avaliado em ambiente citadino e foram usados mapas para calcular o número de nós pelos quais passaram os pacotes que foram entregues com sucesso. Foi demonstrado que o rácio de entrega de pacotes tem mais sucesso e que o atraso diminui.

2.2.8 Cálculo teórico do modelo de propagação

Para se conseguir obter o valor teórico do alcance de comunicação dos veículos, em situação de espaço livre com linha de vista entre os veículos, usou-se a combinação do modelo de propagação “free-space” e do “two-ray ground model”, baseando em [45].

Enquanto o modelo de propagação *free-space* considera apenas a componente de linha de vista do sinal, o modelo *two ray* inclui, para além da componente de linha de vista do sinal, também o efeito das reflexões no solo.

A combinação destes dois modelos é alcançada definindo uma distância de *crossover* C_x dada pela equação (1), onde h_t e h_r são, respectivamente, a altura do transmissor e do receptor e λ é o comprimento de onda.

$$C_x = \frac{4 * \pi * h_t * h_r}{\lambda} \quad (1)$$

O modelo de espaço livre é usado para valores de distâncias inferiores aos valores da distância de *crossover*, enquanto o modelo *two-ray* é usado para valores acima da distância de *crossover*. A utilização desses modelos implica que o receptor esteja a um campo distante da antena do transmissor que pode ser calculada pela equação (2):

$$d_f = \frac{2 * D^2}{\lambda} \quad (2),$$

onde D é a dimensão física mais larga da antena e $\lambda = \frac{c}{f}$, em que c é a velocidade da luz e f é a frequência de operação.

Usando os valores de $D=0,256m$ e $\lambda=0,051m$ para uma frequência de 5.9 GHz, o campo distante da nossa antena seria de $d_f = 2.57m$.

A distância de *crossover* seria $C_x = 650,97$, considerando $h_t = 1.515 + 0,128 = 1.643m$ e $h_r = 1.480 + 0,128 = 1.608m$.

Dado que habitualmente, quer os receptores quer os transmissores estão separados por mais do que a distância a um campo distante e que $d_f \gg D$ e $d_f \gg \lambda$, então os modelos de *free space*, baseados na fórmula de Friis podem ser usados da seguinte forma (equação 3):

$$P_R = P_T + 20 \log\left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right) + G_T + G_R \text{ (dB)} \quad (3)$$

Onde P_R é a potência recebida, P_T é a potência transmitida, R é a distância entre o transmissor e o receptor, λ o comprimento de onda, e G_T o ganho do transmissor, e G_R o ganho do receptor.

De uma forma idêntica, usando o modelo de *two-ray*, a potência recebida pode ser calculada através da equação 4:

$$P_R = P_T - (40 \log(R) - (G_T + G_R + 20\log(h_t) + 20\log(h_r))) \text{ (dB)} \quad (4)$$

Estes resultados vão ser importantes para se poder configurar um modelo semelhante no NS-3 que permita uma replicação o mais próxima possível do real do modelo de propagação.

2.3 Infra-estrutura em Redes Veiculares

A quantidade de investigação a nível de redes veiculares tem crescido fortemente nos últimos anos e a tendência é que, com a necessidade de implementação da tecnologia das redes veiculares, se intensifiquem os estudos. Uma rede veicular pode ser implementada através de uma comunicação V2V (veículo a veículo) pura, no entanto, este tipo de comunicação não seria possível para garantir um bom desempenho, na medida em que fica fortemente dependente da conectividade e da mobilidade da rede. Perante determinados valores de densidades de veículos, a conectividade poderia sofrer fortes reduções, pondo em causa o funcionamento das comunicações. Sendo assim, a implantação de pontos fixos nas redes (RSUs) é usada para se conseguir contornar o problema. Desta forma, as VANETs podem ser complementadas com uma comunicação V2I (veículo com infra-estrutura) onde se recorre às RSUs para melhorar a qualidade da comunicação na rede, com consequente melhoria no rácio de entrega de pacotes e no atraso.

Nesta secção será efectuada uma descrição em relação ao que já se encontra implementado a nível de Redes Veiculares, com particular incidência para cenários com infra-estruturas (que possibilitem a comunicação V2I) que acaba por ser o principal interesse nesta Dissertação de mestrado. Para isso, foram analisados diversos artigos que permitem ter noção do trabalho realizado nesta área.

Existem diversos estudos, na literatura, sobre o posicionamento das RSUs e as suas melhorias, no que diz respeito à comunicação veicular, quer em cenários urbanos, quer em cenários de auto-estrada, [46], [47], [48], [49], [50], [51], [52], [53], [54]. De qualquer forma, esses trabalhos estão mais centralizados no envio de informação do veículo para a infra-estrutura (V2I) quer para acesso à Internet, quer para disseminação de informação, como se pode ver em [46], [47], [48], [49], [50], [51], ou na viabilidade das comunicações em si e não tanto em melhorar a quali-

dade das mesmas. Outro aspecto relevante é que muitos testes apenas consideram uma única direcção de tráfego de veículos.

A distribuição física das RSUs, para otimizar a comunicação, é um factor importante a ter em consideração em qualquer cenário da vida real e a investigação neste tópico é relativamente escassa. [46] apresenta estratégias de colocação das RSUs em cruzamentos, usando a medida da centralidade. Esse artigo sugere que se posicione as RSUs nos cruzamentos, nomeadamente nas localizações mais eficazes da cidade (onde a densidade de tráfego, à partida, não possibilita a ocorrência de períodos sem ligação). O atraso fim a fim da comunicação estava na ordem dos minutos. Em [47], os autores demonstram o impacto que tem um bom posicionamento das RSUs na disseminação quer de informações de segurança, quer de informações de conforto, e desenvolvem um algoritmo para posicionar as RSUs no melhor local geográfico da área urbana de modo a fornecer o máximo de benefícios possíveis à comunicação. Todos os trabalhos são referentes a áreas urbanas que são zonas onde as RSUs causam um menor impacto, uma vez que são muito menos propensas a situações sem ligação.

Em [48], um estudo providencia e designa RSUs como *proxies* para servidores de Internet que transmitem dados para os utilizadores. Em [49], é considerada a colocação de *gateways* para acesso à Internet, mas sob o pressuposto de uma total cobertura pelas RSUs. Esta abordagem determina diferentes objectivos para o aumento da cobertura com o menor número possível de RSUs, garantindo, ainda assim, que todos os veículos sejam capazes de aceder a uma RSU. O trabalho em [50] estuda, maioritariamente por simulação, a viabilidade de disseminar a informação quando as RSUs estão presentes. Contudo, este trabalho acaba por não aprofundar a qualidade da comunicação no que diz respeito à entrega de pacotes ou ao atraso nas comunicações V2I. O trabalho em [51] também analisa a probabilidade de comunicação das RSUs e o comprimento médio de um caminho para atingir uma RSU. Estes trabalhos estão todos direccionados para a disseminação de informação ou para o acesso à Internet em cenários de comunicação V2I, não considerando a comunicação entre veículos (V2V) como base.

Em [52] são investigadas as probabilidades de conectividade em cenários de redes veiculares com infra-estruturas implantadas na rede. Contudo, apenas as probabilidades de conectividade são tidas em consideração e não são consideradas nenhuma medida da qualidade das comunicações, tais como os atrasos ou a entrega de pacotes. Finalmente, em [53], uma plataforma baseada nas filas dá-nos o atraso associado à transmissão de mensagens para uma RSU através de uma comunicação V2V. Este trabalho mostra que os atrasos, mesmo com um aumento do número de RSUs, estão da ordem dos 100 segundos. De realçar que apenas foi considerado um sentido de tráfego, não representando um cenário real onde os veículos que circulam no sentido contrário podem ser utilizados para fazer encaminhamento da informação, sendo que isso é muito importante em cenários de auto-estrada de forma a possibilitar um aumento do sucesso na comunicação entre veículos, pois ajuda a diminuir as lacunas que possam surgir. Além disso, este trabalho apenas considera RSUs desligadas, o que se traduz num aumento ligeiro da densidade final dos elementos que comunicam na rede.

Nenhum dos estudos mencionados acima contempla duas direcções de comunicação, em que os veículos que circulam em sentido contrário podem ajudar a fazer o encaminhamento dos pacotes entre *clusters*, nem tão pouco nos dão uma clara comparação entre os cenários que in-

cluem RSUs desligadas e os que incluem RSUs ligadas, em termos quantitativos. Para além disso, nenhum dos estudos é complementado com resultados provenientes de *testbeds* reais.

Ao longo desta Dissertação de mestrado, temos como objectivo conseguir preencher um vazio existente, realizando determinados testes com recurso a uma plataforma de simulação. Para isso, vamos realizar testes em cenários com veículos a circular em ambas as direcções, vamos fazer comparações entre cenários com RSUs desligadas e cenários com RSUs ligadas e vamos, ainda, reproduzir cenários que foram realizados na *testbed* existente no Instituto de Telecomunicações de Aveiro, de modo a que se possa complementar os resultados das simulações com resultados que ocorreram em cenários reais.

Outro aspecto que não tem sido levado em conta neste tipo de testes mais relacionados com as infra-estruturas, é a possibilidade de os veículos terem instalado um protocolo de encaminhamento. Também aí temos como objectivo oferecer o nosso contributo, sempre com a limitação de se ter de recorrer aos protocolos de encaminhamento existentes em simulação, apropriados mais para MANETs, do que para VANETs.

A nível dos protocolos de encaminhamento passíveis de serem utilizados em simulação, vamos também fazer referência ao trabalho que tem sido feito, nomeadamente no sentido de comparar esses diferentes tipos de protocolos baseados na topologia. Muitos protocolos de encaminhamento têm vindo a ser definidos por investigadores em VANETs. Com o passar do tempo, houve a necessidade de existirem novos protocolos, no sentido de estabelecer mais comunicações de sucesso. A história do encaminhamento para VANETs começa com os tradicionais protocolos de encaminhamento para MANETs. Diversos protocolos de encaminhamento, baseados na topologia, apropriados para MANETs, têm sido aplicados e analisados em VANETs. Vamos agora referenciar algum desse trabalho.

Em [55] foi avaliado o desempenho do AODV e do OLSR aplicados em VANETs, num ambiente citadino. Nesse estudo, todas as características são tratadas através do modelo de mobilidade dos veículos e mostrou-se que o OLSR tem melhor desempenho que o AODV em VANETs, assim como se mostrou, também, que a escolha de parâmetros usados no AODV tem menor *overhead* na rede quando comparados com o OLSR.

Análises de desempenho de protocolos de encaminhamento *ad hoc* tais como o AODV, *Destination-Sequenced Distance Vectoring* (DSDV) e *Dynamic Source Routing* (DSR), em cenários de auto-estrada, são apresentados em [56], onde é demonstrado pelos autores que esses protocolos de encaminhamento não são adequados para VANETs. Os resultados das simulações desse artigo demonstraram que os protocolos de encaminhamento convencionais, apropriados para MANETs, aumentam a carga na rede e diminuem o rácio da entrega de pacotes, assim como o atraso.

Em [57] são comparados o AODV e o DSR com “*Swarm intelligence routing algorithm*” e foi mostrado que, quer o AODV, quer o DSR, têm um desempenho inferior, em VANETs, quando comparados com o “*Swarm intelligence routing algorithm*”.

Em [58] e [59] foi adaptado o protocolo de encaminhamento AODV no sentido de aumentar a estabilidade das rotas e diminuir o *overhead* na rede, tornando o AODV mais apropriado para VANETs, sendo que passaram a designar o protocolo como PAODV (*Prior Ad hoc On-Demand Distance Vector*) e DAODV (*Directional Ad hoc On-Demand Distance Vector*), respectivamente. Esses estudos demonstraram que os protocolos criados encontram rotas mais apropriadas com e

sem previsão de mobilidade. Nesses estudos, foram seleccionadas menos rotas com o objectivo de diminuir o *overhead* na rede gerado pelos protocolos de encaminhamento e isso permitiu que a quebra de ligações fosse melhorada, quando comparada com o AODV tradicional.

Em [60] é comparado o desempenho de dois protocolos de encaminhamento especializados para MANETs: AODV e OLSR. Esse desempenho foi analisado recorrendo a métricas como o rácio de entrega dos pacotes (PDR), atraso fim a fim e número de nós, recorrendo para isso ao simulador NS-2 (*Network Simulator version 2*). Como resultado final concluíram que o AODV terá um desempenho melhor em redes com tráfego estático, que o AODV usa menos recursos que o OLSR e que o OLSR é mais eficiente em redes com grandes densidades. Segundo o artigo, quer o OLSR, quer o AODV têm problemas de escalabilidade devido ao facto de serem protocolos proactivos e reactivos respectivamente. O OLSR tem problemas devido ao aumento das tabelas de encaminhamento e a troca de mensagens de actualização da topologia. O AODV tem problemas de *flooding* com o aumento da densidade. Ambos dependem muito da estrutura da rede.

Em [35] são apresentados resultados de simulações no sentido de verificar qual o protocolo de encaminhamento que apresenta um melhor desempenho (a nível de PDR, atrasos e perdas de pacotes) quando se implementam esses protocolos de encaminhamento numa aplicação de computação em grelha móvel. Aqui são comparados o AODV, o DSDV e o DSR. Como conclusão, esse artigo mostra que o AODV tem um melhor desempenho considerando a sua capacidade para manter a ligação durante trocas de informação periódicas, essencial para tráfego TCP. O AODV, como seria de esperar, garantiu a entrega de todos os pacotes com uma mobilidade reduzida e foi falhando a convergência à medida que a mobilidade aumentava. O DSR apresentou resultados muito bons, em todas as taxas de mobilidade, e o DSDV portou-se quase tão bem como o DSR, mas como necessita de trocar uma série de pacotes de encaminhamento acaba por se tornar mais pesado que o DSR.

Noutro tipo de artigos, em casos específicos, também foi demonstrado que o OLSR apresenta melhores resultados, na globalidade, quando comparado com o AODV, tais como [61] e [62]. Enquanto em [63], [64] e [65], se estudaram protocolos de encaminhamento como o AODV, DSDV, DSR e TORA e se concluiu que o AODV é um dos melhores protocolos de encaminhamento, apresentando melhor desempenho em termos de três métricas: PDR, *overhead* do encaminhamento e optimização de caminhos. Nesses artigos foi evidenciado que o AODV é um bom protocolo de encaminhamento para cenários com grande mobilidade.

Por fim, em [66] é apresentado um estudo comparativo dos protocolos de encaminhamento *ad hoc* (nomeadamente o OLSR, o ADOV e o DSR) em cenários urbanos e de auto-estradas. Nesse estudo, as métricas medidas foram o PDR e o atraso e concluiu-se que o AODV apresenta excelentes resultados, a nível de PDR, em ambos os cenários estudados. Por sua vez, o OLSR apresenta resultados satisfatórios a nível de cenários urbanos, no entanto, em cenários de auto-estrada, assim que o número de nós aumenta, existe um grande decréscimo do PDR. Falando um pouco do atraso, *no caso* do AODV, este valor é muito alto em ambos os cenários, chegando a atingir os 140ms em cenários urbanos e os 130ms em cenários de auto-estrada. O DSR apresenta resultados satisfatórios em ambos os cenários em termos de atraso, enquanto o OLSR apresenta resultados de atraso muito bons em cenários de auto-estrada mas, em cenários urbanos, não tem um comportamento tão bom. Como conclusão final desse artigo, pode-se dizer que o AODV é melhor do que os outros dois protocolos em termos de PDR, pelo que esse protocolo é bom para

realizar comunicações mais delicadas, no entanto, como contrapartida, falha quando o tempo de transmissão deve ser mais reduzido visto que tem um atraso elevado (superior aos restantes protocolos estudados). Para transmissões rápidas, o DSR porta-se bem, mas apresenta perdas de pacotes a mais para transmissões mais delicadas. O OLSR apresenta um desempenho aceitável, mas não é recomendado para nenhum dos casos.

Para além dos protocolos de encaminhamento convencionais, apropriados para MANETs, existem diversos protocolos de encaminhamento baseados na posição dos nós. Uma comparação entre esses dois tipos de protocolos é feita em [67] e [68] onde o estudo efectuado demonstra que o encaminhamento baseado na posição é mais apropriado do que o baseado na topologia em ambientes de grande mobilidade como acontece nas VANETs. O rácio de entrega de pacotes é maior nos protocolos baseados na posição do que nos baseados na topologia.

Sendo assim, podemos concluir que existe uma variação mediante o tipo de ambiente (ambientes citadinos, rurais ou de auto-estradas) do desempenho do AODV e do OLSR (ou de outros protocolos em particular, como o DSDV ou o DSR). Outra conclusão, mediante os trabalhos lidos, é que os protocolos de encaminhamento baseados na posição dos nós têm um desempenho superior aos protocolos de encaminhamento baseados na topologia dos nós.

Uma vez que o simulador usado nos limita aos protocolos baseados na topologia, pretendemos contribuir mais uma vez para o estudo do desempenho desses protocolos a nível de ambiente de auto-estradas, mas agora, ao contrário dos casos mencionados, com infra-estruturas inseridas nos cenários. Note-se que o objectivo principal é o estudo do desempenho da rede veicular com ou sem infra-estrutura, e com diferentes tipos de infra-estrutura, e por isso, o protocolo de encaminhamento é apenas utilizado para a comunicação funcionar de uma forma dinâmica, e não é assim o foco principal do estudo.

2.4 Conclusão

Através do estudo dos trabalhos relacionados, pode-se concluir que as comunicações entre os veículos se vão tornar uma realidade levada a cabo pela necessidade de se aumentar a segurança na estrada, o que implicará um investimento significativo quer da parte das grandes marcas de carros, quer das autoridades de transporte público para concretizar os seus intentos.

Tal como foi referido, existirá uma grande diversidade de aplicações que vão desde a segurança rodoviária ao entretenimento, permitindo assim alargar a área de implementação desta tecnologia e potenciando o crescimento das comunicações entre os veículos. Existe uma vasta gama de possibilidades de estudo e investigação o que torna esta área bastante atractiva, captando a atenção da comunidade de investigação e da indústria automóvel e aumentando, assim, a celeridade no desenvolvimento de sistemas de transporte inteligentes tanto do ponto de vista do condutor (neste caso aplicações do ponto de vista de segurança), quer do ponto de vista do passageiro (neste caso aplicações do ponto de vista de entretenimento).

As redes veiculares estão, então, a emergir como uma nova classe de redes sem fios que se formam espontaneamente entre os veículos em movimento e permitem uma grande variedade de aplicações, tal como já foi referido. Estas redes são bastante promissoras não só para os ope-

radores de rede e fornecedores de serviço, mas também para um grande número de indústrias no sentido de possibilitarem uma nova oportunidade de negócio.

Esta tecnologia está a entrar numa fase em que se estão a investir grandes quantias de financiamento e tempo para desenvolver esta tecnologia em larga escala no sentido de beneficiar os utilizadores com melhorias significativas na segurança das estradas e na circulação fluida de tráfego, que são duas das principais dificuldades dos dias de hoje no que respeita à circulação rodoviária. Neste contexto, existem muitos consórcios a decorrer, nacionais e internacionais, levados a cabo pelas organizações governamentais, pela indústria, ou mesmo por estudos académicos. Exemplos práticos, alguns deles referidos ao longo do capítulo, são:

- *Vehicle Safety Consortium (VSC)*, nos Estados Unidos da América [19];
- *Car-2-Car Communication Consortium (C2C-CC)* [11];
- ETSI-ITS, na Europa;
- *Advanced Safety Vehicle Program (ASV)*, no Japão;
- Esforços de normalização como IEEE 802.11p (WAVE);
- Testes no terreno, em larga escala, como o *Vehicle Infrastructure Integration Program (VII)*, nos Estados Unidos da América;
- Proliferação de conferências e *workshops* relacionados com o tema.

Actualmente, a nível de mercado, pode-se considerar que a penetração deste tipo de redes ainda é bastante reduzida, no sentido em que são necessárias um grande número de infra-estruturas para permitir a implantação, com sucesso, destas redes, o que se traduz num elevado custo associado à produção e implantação das infra-estruturas. Uma forma de reduzir esses custos passa por aproveitar as infra-estruturas já existentes, cuja propriedade pertence aos operadores de rede pois, dessa forma, pode-se reduzir fortemente o investimento inicial e acelerar a implantação desta tecnologia.

Para além disso, é importante referir que diversas organizações estão envolvidas no estudo e na normalização das comunicações entre os veículos, existindo ainda uma série de tópicos em discussão, nomeadamente do ponto de vista da alocação da frequência do espectro na Europa para segurança nas estradas, adaptação da norma IEEE 802.11p/WAVE (que hoje em dia se pode considerar praticamente implementada), e do ponto de vista da integração de múltiplas tecnologias de rede sem fios, segurança de dados, controlo de tráfego, transporte de dados, etc. Espera-se que dentro de 3-5 anos carros produzidos pela BMW, Mercedes, Fiat, Ford, Toyota e Nissan estejam no mercado a funcionar com esta nova tecnologia.

As aplicações que se podem considerar mais relevantes no que diz respeito ao funcionamento eficaz das redes veiculares são o encaminhamento, a segurança e a comunicação confiável.

A nível de protocolos de encaminhamento, conforme se pôde verificar ao longo do capítulo, de forma a tornar o envio de dados perfeitamente adaptado ao tipo de características particulares de redes veiculares, os protocolos que melhor se adaptam são os protocolos baseados na posição dos veículos, nomeadamente os protocolos geográficos, pois com este tipo de protocolos a questão da velocidade elevada dos nós (veículos), assim como a constante mobilidade dos mesmos, acaba por ser atenuada recorrendo à posição dos nós com o auxílio, por exemplo, de um

sistema GPS. O tipo de protocolo de encaminhamento utilizado deve ser um protocolo perfeitamente adaptável a diferentes condições de tráfego, a diferentes densidades, e devem conseguir lidar com diferentes tipos de aplicações. Não existe ainda um protocolo assumido como base pelo que esta continua a ser uma área extremamente activa no que se refere à investigação.

Sendo assim, torna-se claro que existe muita matéria a explorar e todos os esforços serão válidos no sentido de ajudar no crescimento e expansão de redes veiculares. Esta Dissertação pretende contribuir para esse crescimento, simulando cenários reais, de grande escala, com veículos e RSUs e com protocolos de encaminhamento aplicados.

3. Implementação da Plataforma de Avaliação

3.1 Introdução

Neste capítulo, o objectivo passa por, numa primeira instância, apresentar a plataforma de simulação (NS-3), referindo os motivos que levaram a que se optasse por utilizar o NS-3, em detrimento de outros simuladores de rede. De seguida, são apresentadas as funcionalidades do simulador de mobilidade utilizado, de forma a possibilitar a percepção do que foi feito e do que se podia aproveitar desse trabalho, assim como as alterações que foram necessárias introduzir.

Por fim, serão apresentadas todas as alterações que foram introduzidas, assim como as novidades acrescentadas, com o intuito de criar uma *testbed* virtual que permitisse realizar todos os testes propostos no início desta Dissertação.

3.2 Plataforma de Simulação

Antes de se começar a descrever o simulador em si, é necessário fazer uma breve análise à plataforma de simulação (NS-3), nomeadamente às suas principais características, e a alguns conceitos que serão abordados ao longo deste capítulo.

Deste modo, iniciando a apresentação do NS-3, este é um simulador de redes de eventos discretos, escrito em C++, destinado, principalmente, a uso educacional e a investigação e pretende ser o substituto do popular NS-2 [69].

O NS-3 promete ser um simulador mais eficiente e preciso do que o seu antecessor (especialmente para protocolos sem fios, que é precisamente o que pretendemos estudar). Para além disso, o projecto NS-3 está empenhado em construir um núcleo de simulação sólido, bem documentado, fácil de usar e de fazer *debug*, e que atende às necessidades do fluxo de simulação por inteiro, desde a configuração da simulação à sua análise. Por esta razão, decidimos usar o NS-3 para realizar as nossas simulações sobre VANETs.

O NS-3 fornece diversos modelos de mobilidade, no entanto nenhum é apropriado para simular a mobilidade dos veículos. A mobilidade de um nó, nos modelos de mobilidade incluídos no NS-3, depende apenas dele próprio. Numa versão realista da mobilidade de um veículo, a mobilidade de um nó deve depender dos nós que o rodeiam, assim como das condições da estrada. Além disso, esta dependência dos nós torna-se essencial quando as mensagens da rede afectam a mobilidade dos nós na estrada. Como exemplo deste último caso tem-se a recepção de uma mensagem de segurança que pode resultar numa necessidade de redução da velocidade do veículo que a recebeu. Este foi um dos motivos para se ter escolhido o simulador de mobilidade que se falará mais à frente pois entra com todas estas considerações referidas.

- **Modelos de Simulação**

A infra-estrutura do *software* NS-3 estimula o desenvolvimento de modelos de simulação que sejam suficientemente realistas para permitir que este seja usado como um emulador de rede em tempo real, interligado com o mundo real e que permita que muitos protocolos existentes na realidade sejam implementados para serem reutilizados dentro do próprio NS-3.

O núcleo de simulação do NS-3 suporta investigação quer em redes baseadas em IP, quer em redes que não são baseadas em IP. No entanto, a grande maioria dos seus utilizadores está concentrada em simulações com redes sem fios/IP que envolvem modelos para o Wi-Fi, WiMAX ou *Long Term Evolution* (LTE) para as camadas PHY e MAC, e numa variedade de protocolos de encaminhamento estáticos ou dinâmicos como o OLSR e o AODV para aplicações baseadas em IP.

O NS-3 também suporta um escalonador em tempo real que facilita uma série de “simulações em ciclo” que são usadas para interagir com sistemas reais. Por exemplo, os utilizadores podem emitir e receber pacotes gerados pelo NS-3 em interfaces de redes reais e o NS-3 pode servir como uma estrutura de interligação para adicionar os efeitos de ligações entre máquinas virtuais.

3.3 Resumo do simulador de mobilidade

Como já foi amplamente referido, o objectivo desta Dissertação de mestrado passa por efectuar um estudo experimental de comunicação entre veículos, em larga escala, com recurso a uma plataforma de emulação/simulação (NS-3).

Ora, o estudo das redes veiculares *ad hoc* (VANETs) requer ferramentas de simulação eficientes e precisas. Como a mobilidade dos veículos e o comportamento do condutor podem ser afectados pelas mensagens da rede, as ferramentas de simulação devem incluir um modelo de mobilidade veicular com uma simulação da rede de qualidade, com o objectivo de tornar os resultados o mais fiéis possíveis. Dessa forma, e uma vez que o único simulador conhecido que implementa um modelo de mobilidade veicular é aquele que foi produzido por *Hadi Arbabi e Michele C. Weigle* [70], da “*Old Dominion University* [71] (*Department Of Computer Science*)”, foi sobre esse simulador que recaiu a escolha para servir de base às simulações: partiu-se do que já estava feito nesse simulador, aproveitou-se o que se achou relevante e, a partir daí, foram feitas as alterações necessárias pois o simulador estava longe de ser perfeito para as intenções desta Dissertação.

Neste simulador, a mobilidade veicular e a comunicação de rede são integrados por meio de eventos criados pelo utilizador, que podem manipular os veículos de formas diferentes, desde a manipulação da velocidade ao envio de mensagens, desde que se implementem as devidas funções para garantir o funcionamento pretendido. A mobilidade veicular pode ser alterada cada vez que for alterada pelo modelo de mobilidade, caso seja esse o interesse do utilizador. Para ajudar na criação de simulações, os autores implementaram um modelo de auto-estrada em recta que “controla” a mobilidade veicular, permitindo, em simultâneo, várias personalizações do utilizador; de realçar que as explicações terão por base a documentação em [72].

3.4 Arquitectura

Neste capítulo será feita uma análise à arquitectura do simulador. Os diversos componentes existentes neste simulador, como se pode verificar na Figura 8, consistem em cinco classes principais:

- **Vehicle**: Representa um nó com mobilidade, que contém um dispositivo de comunicação sem fios;
- **Obstacle**: Representa um veículo que não tem mobilidade;
- **Model**: Representa o modelo de mobilidade “*Intelligent Driver Model (IDM) car-following*” [73];
- **LaneChange**: Representa o modelo de mudança de faixa MOBIL;
- **Highway**: Contém os objectos da classe **Vehicle** e **Obstacle** e usa as propriedades do **Model** e do **LaneChange** para controlar a mobilidade dos veículos.

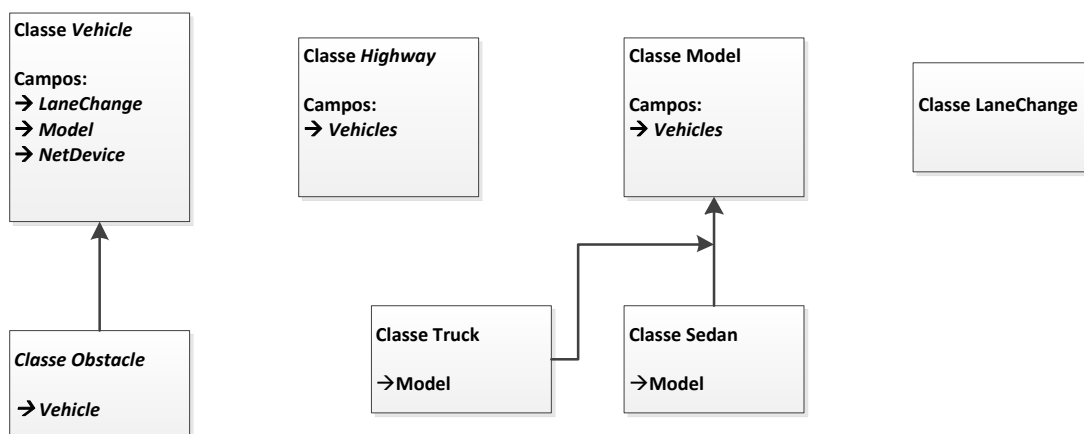


Figura 8, Componentes principais do simulador, adaptado de [72]

A classe **Highway** usa as quatro primeiras classes para gerar tráfego na auto-estrada. Como os modelos de mobilidade veicular e, especialmente, os modelos “*car-following*”, que são implementados neste simulador, necessitam de saber a posição e a mobilidade dos outros veículos, então o objecto **Highway** deve ser utilizado para controlar a mobilidade de todos os veículos. Cada utilizador pode personalizar a auto-estrada, nomeadamente a nível de comprimento da estrada, fluxo de tráfego (unidireccional e bidireccional), número de faixas, comprimento das faixas, etc, de modo a poder criar uma grande variedade de cenários de simulação.

3.4.1 Vehicle

Como foi referido, um veículo é um nó com mobilidade que contém um dispositivo de comunicação sem fios. Este módulo tem as seguintes propriedades:

- **vehicleID**, que traduz o identificador de cada veículo;
- **width**, que nos dá a largura de cada veículo, em metros;
- **length**, que nos dá o comprimento de cada veículo, em metros;
- **lane**, que é o numero da faixa da auto-estrada onde o veículo está localizado;
- **direction**, (-1,1), assumindo 1 como a direcção para este e -1 a direcção para oeste;
- **position**, que é um vector (x,y,z), em que x representa a posição da traseira do veículo, y o centro do veículo e z a altura do veículo acima do nível da estrada. Todas as unidades em metros;
- **velocity**, em m/s;
- **acceleration**, em m/s^2 ;
- **model**, que representa os ajustes do modelo de mobilidade. A velocidade desejada para cada veículo está associada ao modelo de mobilidade;
- **lanechange**, que traduz a possibilidade de configurar as mudanças de faixa de cada veículo.

Neste simulador, o objecto **Highway** é responsável pela gestão das posições, das direcções e pelas faixas que cada veículo ocupa. A aceleração e a velocidade de cada veículo podem ser definidas directamente pelo utilizador, ou podem ser calculadas com base nas regras do modelo IDM (*Intelligent Driver Model*) de mobilidade [73]. Um veículo tem a capacidade de mudar de faixa, se necessário e se possível, baseado no “*MOBIL lane change model*” [74]. Os objectos da classe **Vehicle** podem ser criados manualmente e inseridos na estrada, ou podem ser gerados e injectados automaticamente na auto-estrada. Mais uma vez, cabe ao utilizador decidir e projectar a solução que necessitar.

Visto que cada veículo tem um dispositivo de comunicação sem fios, também este tipo de comunicações podem, e devem, ser controladas. Cada veículo deve ser capaz de comunicar com outro (dentro de determinadas especificações de alcance) através dos canais de Wi-Fi padrão do NS-3. As mensagens, incluindo pacotes enviados e recebidos, e todos os eventos relacionados, podem ser capturadas definindo os “*event handlers*” apropriados para as funções de *callback* implementadas, que são concebidas e consideradas para esses fins. Conforme será perspectivado, nenhuma das funções de *callback* que diga respeito às mensagens enviadas ou recebidas foi utilizada, uma vez que essa parte do simulador original foi eliminada e refeita consoante as nossas necessidades.

Um veículo, geralmente, pode enviar pacotes por *unicast* ou pode enviar mensagens de *broadcast*. No intuito desta Dissertação de mestrado, como o objectivo passa pelo teste de cenários que envolvem algoritmos de encaminhamento instalados, não tem sentido enviar as mensagens/pacotes para *broadcast*, pelo que serão feitas alterações também aqui.

3.4.2 Obstacle

Um obstáculo não é mais do que um nó estático sem mobilidade que contém, também ele, um dispositivo de comunicação sem fios. Esta classe é herdada da classe **Vehicle** e tem todas as capacidades desta, excepto o facto de não se poder mover (velocidade, aceleração e “*lane-change*” são nulos). Um obstáculo pode ser usado como uma barreira para fechar uma faixa ou para criar paragens temporárias de modo a aumentar o congestionamento da estrada. Um obstáculo pode, também, ser usado como uma RSU (*Road Side Unit*) ou uma outra infra-estrutura, junto, mas do lado de fora, da estrada. No caso de um obstáculo ser colocado na estrada, tal como os veículos, este deve ter um número de faixa e uma direcção. Como referido, à excepção da mobilidade, tudo o que pode ser feito por um veículo, pode ser feito, também, por um obstáculo. Dessa forma, muitas vezes, ao invés de se utilizar esta classe, usa-se directamente a classe **Vehicle**, mas sem definir a mobilidade. De forma a simplificar e visto que o funcionamento é rigorosamente o mesmo, a nossa opção para criar as infra-estruturas (RSUs) recaiu em usar a classe **Vehicle** ao invés da **Obstacle**.

3.4.3 Mobility Model

Model é a classe que implementa o modelo de mobilidade de um veículo. Neste simulador, os autores optaram por implementar, no NS-3, o modelo IDM, já referido acima, baseado nas equações e parâmetros desenvolvidos por Treiber [73]. O IDM é um modelo de “*car-following*” em que a aceleração ou desaceleração de cada veículo depende, não só da sua própria velocidade e da velocidade desejada, como também da posição e velocidade do veículo imediatamente à sua frente, na mesma faixa, que é designado por Treiber como “*front vehicle*”.

Cada veículo, no IDM, tem uma velocidade desejada, um “*safety time headway*” (isto é, tem um tempo mínimo necessário para ultrapassar a lacuna existente entre dois veículos, e.g., usa-se a “regra dos 2 segundos”), uma aceleração sem tráfego, uma desaceleração confortável de travagem, em caso de necessidade, e uma distância mínima de segurança para o veículo da frente. O IDM usa estes parâmetros e o estado actual, quer do próprio veículo, quer do veículo da frente, para calcular a nova aceleração. Essa aceleração será, por sua vez, usada para fazer a actualização da velocidade e da posição de cada veículo. Quando a velocidade do veículo se aproxima dos valores pretendidos, então esta aproxima-se de zero.

A função “*CalculateAcceleration*” usa as equações IDM para calcular e devolver a aceleração em cada “*step time*”.

Este simulador permite definir modelos diferentes consoante se esteja a falar de carros (*Sedan class*) ou de camiões (*Truck class*), permitindo variar os parâmetros consoante os diferentes casos.

3.4.4 Lane Change Model

LaneChange é a classe que implementa o modelo de mudança de faixa para um veículo. Neste simulador, os autores optaram por implementar o “*MOBIL lane change model*”, baseado nas equações e parâmetros desenvolvidos por Treiber [74]. Cada mudança de faixa, neste modelo, deve satisfazer o critério de segurança e o critério de incentivo. O critério de segurança diz que a mudança de faixa não deve fazer com que o veículo que está a ser ultrapassado tenha uma desaceleração brusca que cause insegurança. O critério de incentivo é satisfeito se a vantagem da mudança de faixa do veículo for superior à desvantagem dos outros veículos.

Para concretizar o critério de incentivo, o MOBIL primeiro calcula a vantagem da mudança de faixa do veículo, que não é mais do que a diferença entre a aceleração actual do veículo e a aceleração do veículo depois de mudar de faixa. O objectivo passa por aumentar a aceleração ou reduzir a desaceleração de travagem. A desvantagem quer para o veículo de trás da mesma faixa, como para o veículo de trás da nova faixa, são contabilizadas também. Mais uma vez, isso é feito comparando a aceleração antes da mudança de faixa com a aceleração depois da mudança de faixa.

A função “*CheckLaneChange*”, presente nesta classe, retorna uma variável booleana indicando se se pode proceder à ultrapassagem ou não. Essa função também usa as equações do MOBIL.

Esta classe acabou por não ser devidamente usada (mais à frente serão detalhadas as opções tomadas); no entanto, optou-se por fazer uma descrição do modelo, visto que este foi objecto de estudo e de testes, até se chegar à conclusão que, para os cenários que se pretendia testar, não havia necessidade de recorrer a este módulo.

3.4.5 Highway

Highway é a classe que contém os veículos e gere a sua mobilidade. Nesta secção serão discutidas as propriedades físicas da auto-estrada, as tarefas de gestão dos veículos, assim como a possibilidade que os utilizadores têm de poder controlar os veículos na auto-estrada, com o objectivo de variar e adaptar as simulações consoante os diferentes interesses finais.

3.4.5.1 Propriedades Físicas

A classe **Highway** representa uma auto-estrada cuja topologia é uniforme e recta e tem as seguintes propriedades físicas:

- **Length** – comprimento da auto-estrada em metros;
- **Number of lanes** – número de faixas em cada direcção, podem ir de uma a cinco;
- **Lane width** – largura da faixa em metros;
- **Median gap** – largura da mediana em metros;

- **Bidirectional** – variável booleana que é verdadeira se a auto-estrada tiver dois sentidos de tráfego e falsa se tiver apenas um.

3.4.5.2 Gestão dos Veículos

Existem diversas funções de gestão dos veículos que a classe **Highway** dispõe. Esta classe pode criar automaticamente veículos com certos parâmetros, inserir esses veículos em determinadas faixas e mover esses veículos de acordo com os seus modelos de mobilidade e mudança de faixa. No entanto, nos nossos testes, nenhuma dessas situações ocorrerá.

3.4.5.2.1 Criação automática e Injecção de veículos

Quando o parâmetro “*AutoInjection*” da **Highway** é “verdadeiro”, então os veículos serão automaticamente criados e injectados na auto-estrada. Para este propósito, a classe **Highway** cria modelos padrão de mobilidade com parâmetros definidos apropriadamente para carros e camiões, chamados “*Sedan Model*” e “*TruckModel*”, respectivamente. A classe **Highway** também cria modelos padrão para a mudança de faixa com os parâmetros adequados a carros e camiões. A relação entre carros e camiões que são criados é controlada pelo parâmetro “*injectionMix*”. Os veículos criados automaticamente são criados com os canais padrão de *Wi-Fi Phy/Mac* apropriados às *VANETs*.

A inserção de veículos rege-se segundo alguns princípios pré-estabelecidos. A classe **Highway** define cada faixa como uma “*structure list*”. Quando um veículo é adicionado à auto-estrada, este é inserido em virtude de parâmetros pré-estabelecidos, tais como a sua faixa, a sua direcção e a sua posição segundo o eixo dos ‘xx’. No caso de a simulação inserir veículos automaticamente, existe um parâmetro “*minGap*” que especifica a distância mínima entre dois veículos que entram na auto-estrada. Este valor determina que os veículos recém-criados apenas são inseridos quando o último veículo inserido se encontra a uma distância “*minGap*” do início da auto-estrada. De realçar também que os veículos têm determinadas dimensões e, de modo a que o início do veículo coincida com o início da auto-estrada, inicialmente os veículos são inseridos com uma posição negativa para que a frente do veículo coincida com o início da estrada ($x=0m$). A análise da estrada, de modo a verificar se novos veículos podem ser adicionados, é feita segundo um mecanismo de *round-robin*, começando na faixa mais à direita (faixa 0) com direcção este (“*direction*=1) até à faixa mais à esquerda, em direcção a oeste (“*direction*=-1), obviamente que este último caso apenas ocorre em situações em que a estrada é bi-direccional. Deste modo, no caso de a estrada ser bi-direccional, os veículos são adicionados em ambas as direcções ao mesmo ritmo.

3.4.5.2.2 Mobilidade dos Veículos

A cada “DeltaT” segundos, a classe **Highway** chama a função que actualiza a posição, velocidade e aceleração de cada veículo, de acordo com o seu modelo de mobilidade. É deste modo que veículos com características diferentes de mobilidade (e.g. camiões, veículos de emergência médica, etc) podem ser representados na mesma auto-estrada.

Como já foi referido, os veículos são actualizados segundo uma filosofia *round-robin*, começando pelos veículos da faixa mais à direita na direcção este. Depois de feita a actualização, se a posição de um veículo é superior ao comprimento máximo da auto-estrada, então esse veículo é removido da lista da faixa. Assim que é terminada a verificação a cada uma das faixas, com as posições de cada veículo devidamente actualizadas, a injeção automática insere novos veículos, isto nos casos em que temos inserção automática de veículos.

Se for possível ocorrerem ultrapassagens, então a cada $10 \times \text{“DeltaT”}$ segundos é avaliada a oportunidade para cada veículo mudar de faixa de modo a evitar padrões irrealistas de mudança de faixa (tais como um veículo mudar de faixa mais do que uma vez a cada segundo, por exemplo). No caso de, depois de ser feita a devida avaliação (de acordo com os “*Vehicle’s MOBIL parameters*”), um veículo puder mudar de faixa de forma segura, então a **Highway** remove o veículo da faixa actual e adiciona-o na faixa de destino, na posição pretendida (a nível do eixo dos xx) de acordo com o IDM/MOBIL. Quando uma mudança de faixa é permitida, essa mudança ocorre antes de a mobilidade ser actualizada, pelo que um veículo que muda de faixa apenas tem a sua mobilidade actualizada uma vez em cada “DeltaT” segundos.

Estudos demonstram que o melhor tempo de reacção de um motorista é de 0,7 segundos [75] pelo que os autores escolheram uma actualização (valor de “DeltaT”) de 0,1 segundos, para que a posição de cada veículo fosse actualizada com mais frequência do que o tempo de reacção de um motorista.

3.4.5.2.3 Controlo dos veículos da parte do utilizador

Para permitir um “*feedback*” entre a rede e o modelo de mobilidade, deve haver uma forma para as aplicações dos utilizadores interagirem com cada veículo. A classe **Highway** permite ao utilizador aceder a qualquer veículo através do seu “*VehicleID*”, usando para esse efeito a função “*FindVehicle*”. O utilizador pode então usar esse objecto retornado pela função para alterar qualquer um dos parâmetros do veículo. Para aceder a esses veículos em instantes de tempo particulares, a classe **Highway** desencadeia vários eventos que podem ser vinculados a um “*event handler*”, criado pelo utilizador.

Os eventos mencionados no parágrafo anterior são os seguintes: *InitVehicle*, *ControlVehicle* e *ReceiveData*.

- **InitVehicle**

O **InitVehicle** é “ativado” na inicialização da classe **Highway**, o que dá ao utilizador a possibilidade de criar cenários personalizados ou modificar as configurações iniciais. Embora seja possível ao utilizador criar e posicionar veículos em qualquer altura, o local ideal para criar e colocar os veículos iniciais na auto-estrada é dentro da **InitVehicle**. No caso de a “AutoInjection” estar definida como “verdadeiro” na **Highway**, os veículos criados automaticamente mover-se-ão em torno dos veículos criados anteriormente. Ao **InitVehicle** é passado um ponteiro para a **Highway** e uma referência a um “vehicleID” (definido como 1 inicialmente). Qualquer veículo criado manualmente deve usar e incrementar o “vehicleID” para que cada veículo tenha uma identificação exclusiva. É de realçar que qualquer veículo criado manualmente será controlado pela auto-estrada de acordo com o respectivo modelo de mobilidade. O “event handler” (neste caso a **InitVehicle**) deve retornar “verdadeiro” se os veículos forem adicionados manualmente à **Highway**, ou se forem modificadas as configurações padrão. Nesse caso a **Highway** ordenará as listas das diferentes faixas baseada nas posições dos veículos. Se nenhum veículo tiver sido adicionado manualmente, então não há motivo para ordenar as listas e o “event handler” retorna “falso”.

- **ControlVehicle**

O **ControlVehicle**, para cada veículo, é desencadeado por uma função que é executada a cada “DeltaT” segundos. Desta forma, o utilizador tem um controlo total de cada veículo a cada 0,1 segundos. Por exemplo, nesta função, um determinado veículo pode ser mandado parar ou desacelerar no sentido de criar um congestionamento do tráfego. Além disso, o **ControlVehicle** é a função ideal para se imprimir as localizações dos veículos e, deste modo, termos uma visão aproximada do que se está a passar na realidade. A este “event handler” é passado um ponteiro para a **Highway**, um ponteiro para um veículo particular e um valor de “DeltaT”. Se o “event handler” mudou a posição do veículo, então deve retornar “verdadeiro”, pelo que a aceleração do veículo não será actualizada pelo modelo de mobilidade. Caso contrário, então deve ser retornado “falso” e a **Highway** irá ajustar a posição do veículo de acordo com o modelo de mobilidade.

- **ReceiveData**

Por fim, falta referir o evento **ReceiveData** que é “ativado” quando qualquer veículo recebe dados com sucesso da rede. Ao **ReceiveData** é passado um ponteiro para o veículo que recebeu os dados, um ponteiro para o pacote de dados e o endereço MAC do veículo que enviou o pacote.

De realçar que este último “event handler”, **ReceiveData**, não será utilizado no nosso simulador uma vez que, como se pretende testar os protocolos de encaminhamento, é necessário atribuir endereços IP e enviar os dados sobre a camada TCP/IP, o que não é feito no simulador base.

3.5 Utilização e adaptação do Simulador

Depois de feita uma análise ao simulador em si, de seguida pretende-se descrever as alterações que tiveram de ser feitas para possibilitar a realização dos testes pretendidos. Assim, vão ser analisadas as cinco classes descritas anteriormente no sentido de deixar bem claro o que se vai aproveitar, o que se vai remover e o que se vai fazer de novo, de modo a que, com essas novidades implementadas, se possam construir os cenários desejados.

É de notar que esta foi a parte mais complexa de todo o trabalho despendido pois, em primeiro lugar, foi necessária uma adaptação à plataforma de simulação em si (NS-3), com a qual nunca tinha havido qualquer tipo de trabalho prévio; depois, foi necessária uma adaptação e interpretação ao código do simulador que permitisse definir não só o que poderia ser reutilizado, como também de que maneira seria usado e, só depois disso, foi possível perceber o que faltaria acrescentar para cumprir todos os requisitos pretendidos.

Posto isto, as próximas subsecções pretendem esclarecer todo o processo.

3.5.1 Vehicle

No módulo **Vehicle** aproveitaram-se todas as propriedades enunciadas acima, de modo a poder tornar mais reais as características de cada veículo. Para isso, definiu-se o comprimento e a largura (neste caso 4*2 metros, respectivamente), definiu-se também a velocidade em m/s (na maioria dos casos o valor escolhido foi de 30m/s, excepto em alguns cenários pontuais em que se usou 13.89 m/s) e definiu-se, consoante a situação, uma faixa e uma direcção (este ou oeste) para cada veículo, bem como a sua respectiva posição dentro dessa faixa.

Outro aspecto importante foi o de atribuir um identificador a cada veículo, de forma a possibilitar o acesso aos diferentes veículos, sempre que necessário, bastando para isso recorrer a uma função designada por “FindVehicle”, existente para o efeito.

Sendo assim, dentro do módulo principal que será analisado mais abaixo e que foi elaborado para se poder criar os diferentes cenários, existe uma parte de criação de veículos que configura não só toda a informação referida acima, como ainda configura o canal Wi-Fi (que vai permitir uma comunicação entre os veículos), configura um modelo para o veículo (recorrendo à classe **Mobility Model**) e um modelo de ultrapassagem (baseado no **Lane Change Model**). Por fim, definiu-se também a aceleração de cada veículo que, de modo a manter constante o número de veículos por km ao longo da estrada, vai ter o valor de 0m/s², pois assim é garantido que o fluxo de veículos introduzido no início da auto-estrada é mantido ao longo de toda a estrada.

De referir que, no módulo **Vehicle**, apenas se associa estas características a cada veículo cabendo depois ao objecto **Highway** a gestão desses atributos.

Até este ponto, apenas foram referidas as características de cada veículo definidas no módulo principal. De seguida, vai ser feita uma referência específica às alterações inseridas no módulo **Vehicle**, a nível de código.

3.5.1.1 Desafios e Desenvolvimentos

Um dos primeiros “problemas” que se enfrentou ao longo de todo o trabalho começou neste módulo.

Uma vez que os testes elaborados no decorrer desta Dissertação de mestrado incluíam protocolos de encaminhamento instalados nos veículos, era necessário obrigatoriamente, associar um endereço IP a cada veículo, de forma a poder aplicar esses mesmos protocolos de encaminhamento.

- **Associação de endereços IP**

À partida, adicionar IPs a diferentes nós no NS-3 seria um processo simples, tal como se pode ver em [76] pois, habitualmente, existem “*containers*” que, no fundo, acabam por ser “estruturas” que vão conter os diferentes nós do sistema e que são criados logo à partida com o número de nós que se pretende numa simulação.

Aliás, o procedimento habitual, mesmo para redes veiculares, é o seguinte:

- ✓ Define-se um determinado número de nós (veículos) que se pretende numa simulação;
- ✓ Cria-se um *container* com esse número de nós;
- ✓ Adiciona-se um determinado modelo de mobilidade;
- ✓ Configura-se, devidamente, a interface de cada nó a nível de:
 - *Wi-Fi*;
 - *Stack* de Internet;
 - Endereços IP;
 - Aplicações para o envio de informação, entre outros.

Depois de feitos todos os passos anteriores, tem-se o cenário criado. De referir que esta é a forma mais simples de se construir um cenário de simulação de redes veiculares; no entanto, depois de se ter conhecimento das potencialidades do simulador a adaptar, e conhecendo os pontos negativos desta solução, verifica-se que esta solução não pode ser utilizada. Esta solução é estática e cada nó apenas considera as suas próprias características (nomeadamente a nível de mobilidade).

Continuando a análise ao procedimento habitual descrito acima (de forma a tornar perceptível a origem do problema), depois de se ter o *container* com os nós pretendidos, basta associar a interface de cada nó a um endereço IP. A única coisa que é definida pelo utilizador é a base do endereço IP e a máscara da rede que vão ser usados. A associação de um endereço IP diferente a cada interface é feita a um nível mais baixo, dentro do “*helper*” do módulo base do NS-3: “*IP address*”. Acontece que, nos cenários desenvolvidos no seguimento desta Dissertação, os nós não serão todos criados à partida, pelo contrário, a sua criação será dinâmica e processar-se-á ao longo de toda a simulação, correspondendo a determinadas densidades de veículos que foram definidas de forma a poder realizar todo o tipo de testes pretendidos (com maiores e menores densidades). Deste modo, existirão diferenças em relação ao processo habitual já que, todo o processo

referido em cima, acontece depois de todos os nós estarem criados, o que nunca vai acontecer neste caso, pois os nós são criados ao longo de toda a simulação.

De modo a evitar que fosse atribuído o mesmo endereço IP a diferentes nós, que seria impeditivo de prosseguir as simulações, foi criada uma função que adicionasse, dinamicamente, o IP a cada nó que fosse criado, ao invés de adicionar a um conjunto de nós.

Dentro do módulo **Vehicle** existe uma função, de nome **“SetupWifi”**, para configurar as interfaces de cada nó a nível de Wi-Fi e que foi alterada de modo a conter, quer a configuração dos endereços IP (dentro dessa função é invocada a função de adição dinâmica de IPs mencionada anteriormente), quer a *stack* de internet, ou ainda os diferentes protocolos de encaminhamento devidamente configurados (neste caso o OLSR e o AODV).

- **Função “SetupWifi”**

Na Figura 9 é exemplificado o que sucede de cada vez que é invocada a função **“SetupWifi”**. Esta função, que é importante para fazer comunicar devidamente os veículos, sejam eles as RSUs, que funcionarão como veículos sem mobilidade, ou os próprios carros, foi completamente reformulada, de modo a permitir uma correcta adaptação aos nossos interesses.

De uma forma geral, cada vez que um veículo é criado, ocorre o seguinte:

- No módulo principal, entre outras coisas, é configurado o Wi-Fi. Para fazer essa configuração é chamada a função **“SetupWifi”**, com determinados parâmetros passados, para efectuar essa configuração. Dentro dessa função, configura-se não só o Wi-Fi, mas também:
 - Endereçamento IP de cada veículo;
 - Stack de Internet;
 - Instalação dos protocolos de encaminhamento.

Assim, esta função, que vai ser invocada quer para configurar os veículos, quer para configurar as RSUs, vai possuir dois *containers* distintos.

Um dos *containers* armazena indiferenciadamente os veículos e as RSUs e o outro armazenará apenas as RSUs. Esse segundo *container* terá um papel importante quando se quiser ligar as RSUs entre elas, uma vez que se vai precisar de associar outra interface (para além da interface sem fios principal para comunicação com os veículos) a cada RSU, sendo preciso configurar uma nova rede com IPs de outra gama.

A função foi dividida para funcionar em cenários que incluam apenas veículos, numa comunicação V2V, naquele que pode ser considerado um primeiro caso, e cenários que incluam também RSUs, numa comunicação V2I, que representa um segundo caso.

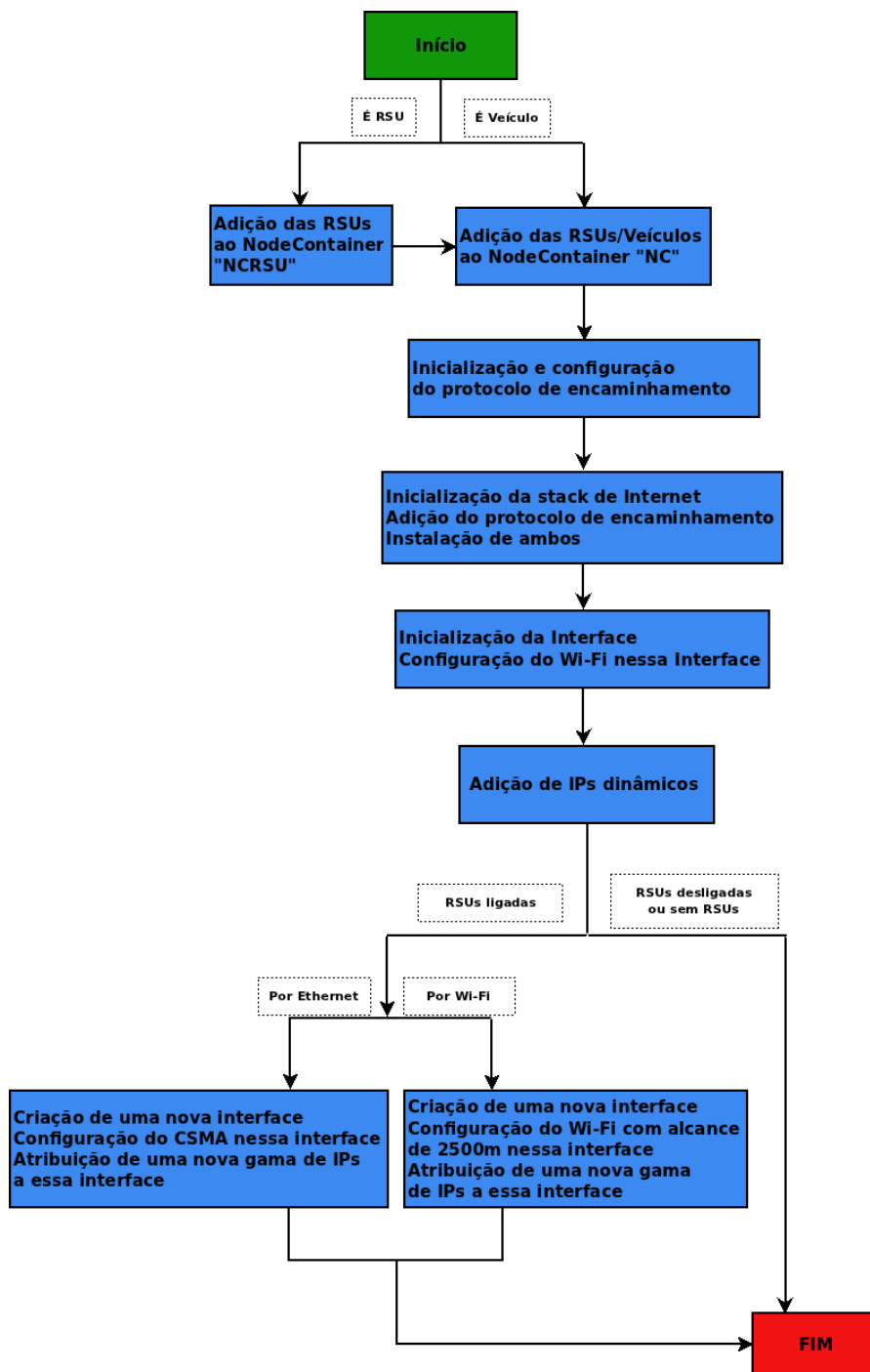


Figura 9, Diagrama de Fluxo da Função SetupWifi

No primeiro caso, será necessário configurar, no primeiro *container*, o protocolo de encaminhamento, seguido da *stack* de internet (a ordem tem de ser exactamente esta, pois o protocolo de encaminhamento vai ser “adicionado” à *stack* de internet antes da sua instalação) e, desta forma, fica a *stack* de internet, com o protocolo de encaminhamento configurado, instalada em todos os nós desse *container*.

Depois de terminado o passo anterior, configura-se a interface de cada nó com o Wi-Fi e atribui-se um endereço IP. De referir que tudo isto é feito dinamicamente cada vez que é criado um veículo.

No segundo caso, para além do que foi referido anteriormente, existe, para além disso, o tal segundo *container* que vai armazenar as RSUs. Resumindo, até à criação da última RSU, a função adiciona as RSUs a ambos os *containers*. Portanto, esta primeira fase, quando comparada com o caso anterior, apenas tem a diferença de adicionar as RSUs a ambos os *containers*. O resto passa-se da mesma forma de modo a configurar a primeira Interface, quer nos veículos, quer nas RSUs.

A partir desta primeira fase, existe uma divisão entre cenários com RSUs desligadas e cenários com RSUs ligadas.

No caso de ser um cenário com RSUs desligadas, então terminam as configurações e estamos num caso muito semelhante ao primeiro. Se for um cenário com RSUs ligadas vai ser necessário configurar-se uma nova interface (Wi-Fi ou Ethernet, consoante o caso) o que justifica a necessidade do tal segundo *container*. Isto é, se estivermos a falar dum cenário com RSUs ligadas por Wi-Fi, então é necessário criar uma nova interface Wi-Fi com um alcance superior para comunicação entre as RSUs (neste caso com um valor aproximado de 2500m). No caso de ser um cenário com RSUs ligadas por Ethernet, então é necessário criar uma nova interface Ethernet. Sintetizando, o processamento neste segundo caso vai ser o seguinte:

- **Interface 1:**
 - Configuração do protocolo de encaminhamento;
 - Configuração da *stack* de Internet;
 - Configuração da interface Wi-Fi;
 - Atribuição de endereços IP;
- **Interface 2:**
 - Configuração da Ethernet (CSMA – *Carrier Sense Multiple Access*) / Configuração de uma nova interface Wi-Fi;
 - Atribuição de endereços IP (gama diferente da anterior);

Para diferenciar os casos em que vão existir RSUs ligadas dos restantes, existe uma variável booleana designada “isRSU” que passa a “verdadeiro” quando é criada uma RSU. De notar que a segunda interface que necessita de ser criada nos cenários com RSUs ligadas por Ethernet ou por Wi-Fi existe com o único intuito de garantir que essa interface apenas serve para comunicar entre as RSUs, numa nova rede. O resto da criação dos veículos e da primeira interface processa-se normalmente.

Posto isto, fica-se com a possibilidade de criar cenários só com veículos, cenários com veículos e RSUs desligadas (neste caso funcionam apenas como veículos parados) e cenários com veículos e RSUs ligadas entre si por Ethernet ou por Wi-Fi, permitindo tirar diversas conclusões.

Por fim, a última alteração que foi necessário introduzir nesta classe foi uma função que permite imprimir as tabelas de encaminhamento, quer do OLSR, quer do AODV, o que se revelou

essencial, numa primeira fase, para entender o funcionamento destes protocolos e ultrapassar os erros existentes, e numa segunda fase, para obtenção dos resultados finais de número de saltos.

3.5.2 Obstacle

Este módulo servia para se poderem criar as RSUs. Dado que uma solução com a mesma validade passava por considerar as RSUs como veículos, mas sem mobilidade, de forma a não complicar desnecessariamente o cenário, optou-se por não recorrer a este módulo.

3.5.3 Mobility Model

O modelo de mobilidade, cujas especificações já foram referidas anteriormente, não foi alterado. No entanto, de forma a ser possível tirar algumas conclusões do simulador, foi necessário desactivar a inserção automática dos veículos (para possibilitar a utilização de densidades pré-definidas de veículos, consoante o interesse para os diferentes cenários). De modo a manter constante o número de veículos/km ao longo de todo o trajecto (ou seja, a densidade de veículos), optou-se por não utilizar a aceleração pelo que, o único caso para o qual se utilizou este módulo foi para definir o modelo de cada carro (Sedan class), devidamente adaptado ao que se acabou de referir (velocidade e aceleração constantes).

3.5.4 Lane Change Model

Como já foi realçado, esta classe acabou por não ser usada, devido ao facto de não ser relevante para os estudos efectuados. No caso de ser necessário testar nesta Dissertação casos de ultrapassagem, bastava garantir que os veículos da faixa mais à esquerda circulavam com uma velocidade superior aos da faixa mais à direita. Desta forma, acabariam por ocorrer, inevitavelmente, ultrapassagens entre os veículos de ambas as faixas. Aquando da criação de cada veículo, o modelo de ultrapassagem era imediatamente configurado. No entanto, a condição de ultrapassagem era desactivada.

3.5.5 Highway

A classe **Highway** representa uma auto-estrada com algumas das suas propriedades físicas, tais como o seu comprimento, o seu número de faixas, a largura em metros de cada faixa ou, ainda, se essa estrada é bidireccional ou não, etc. Dependendo dos cenários estudados, estes valores poderão variar, com a excepção da largura da faixa (5 metros) e do comprimento da estrada (13 km).

Convém referir que uma das razões que levaram a não se inserir injeções automáticas de veículos na estrada se deveu ao facto de qualquer trabalho experimental, sobre o qual se queiram tirar conclusões, necessitar de diversas simulações, de forma a ser possível fazer a média dos resultados e encontrar um padrão sobre o qual se possa concluir algo. Repetir várias vezes as experiências, garantindo que as simulações são aleatórias, é a única forma de ter a certeza que os resultados não foram casuais. Este processo só é possível no caso de a inserção de veículos ser feita segundo uma variável aleatória (exponencial, neste caso, pois a inserção de veículos é modelada por uma função exponencial que retrata a densidade dos veículos na realidade, tal como se pode ver em [77]). Deste modo é possível correr várias simulações onde se varia o tempo de inserção dos veículos e, assim, se possibilita o teste de cenários em tudo semelhantes mas com algumas diferenças, aproximando-se um pouco mais da realidade.

Outro aspecto referente a esta classe é que esta controla a mobilidade dos veículos. Basicamente, a cada “DeltaT” segundos (variável definida com o valor de 0.1) é chamada a função de “step” que actualiza a posição, a velocidade e a aceleração de cada veículo de acordo com o definido. Essa actualização é feita segundo uma filosofia *round-robin*, começando no veículo da faixa mais à direita, na direcção Este.

Esta classe dispõe de algumas funções que permitem aceder aos diferentes veículos. De todas elas, a função “FindVehicle” é bastante útil, pois permite encontrar e devolver os veículos desejados pelo utilizador. Esse processo acaba por ser simples pois os veículos encontram-se armazenados dentro de “structlists” (existe uma para cada faixa), criadas aquando da inserção dos veículos na auto-estrada.

3.5.5.1 Funções Implementadas

Foram criadas, de raiz, duas funções neste módulo: uma função para procurar o veículo de destino, consoante os diferentes cenários, de nome “**vdestino**”, e uma outra para adicionar os pacotes a cada veículo, de modo a poderem ser enviados de nome “**addpacket**”. De seguida será descrito o raciocínio por detrás destas funções.

- **Função “vdestino”**

Esta função foi criada com o objectivo de se automatizar o cálculo do veículo de destino: como um dos cenários tem como objectivo enviar pacotes desde o primeiro veículo para um veículo situado, suponhamos, a 4000m de distância, então criou-se uma função que consegue aceder à posição de cada veículo, em qualquer instante que se pretenda, e consegue devolver um veículo localizado, aproximadamente, a essa distância da fonte.

Sendo assim, no módulo principal elaborado e apresentado na secção seguinte, no instante em que se pretenda enviar informação, será necessário aceder à posição do veículo fonte, calcular duas distâncias de segurança em relação a um veículo localizado a aproximadamente 4000m desse valor, para o caso de não existir nenhum veículo exactamente a 4000m (por exemplo), e passar esses valores para a função “vdestino”.

Depois da função “vdestino” ser invocada é percorrida a lista de veículos, um a um, de modo a verificar se a sua posição está dentro dos dois valores passados. Em caso afirmativo, armazena-se esse veículo numa lista auxiliar criada para o efeito e, depois da lista de veículos ter sido totalmente percorrida e a lista auxiliar estar totalmente preenchida, ordena-se essa lista auxiliar de modo a ser devolvido o veículo cuja posição se encontra mais próxima do valor pretendido que, para o caso que se tem mencionado, significa devolver o veículo cuja distância à fonte está mais próxima dos 4000m.

- **Função “Addpacket”**

- **Funcionamento original do envio de pacotes:**

Para explicar o funcionamento da segunda função, existe a necessidade de se fazer um apanhado geral acerca do tipo de troca de mensagens implementado no simulador original.

Como já foi referido, a classe **Highway** desencadeia vários eventos passíveis de serem vinculados a um “event handler”, isto é, a uma função que consiga manipular esses eventos. No simulador original existe uma função que adiciona os pacotes a cada veículo que tenha a necessidade de enviar informação. Essa adição passa por incrementar um *buffer* que depois vai ser constantemente lido pela função *controlvehicle* (*callback* existente no módulo principal). No caso de esse *buffer* conter algum tipo de informação, então é invocada uma função para criar e enviar os pacotes para *broadcast*.

Para além do “event handler”, para ler durante a simulação (em “tempo real”) o *buffer* de cada veículo, existe ainda um outro relacionado com a recepção de pacotes. Cada vez que um veículo recebe um pacote, essa função verifica se esse veículo já contém esse pacote no *buffer* (através de um “packet id” associado a cada pacote) e, em caso negativo, armazena-o nesse mesmo *buffer* e envia por *broadcast*. Caso contrário, é descartado. Ou seja, gera-se uma sucessão de recepções e envios de pacotes da parte dos veículos que está longe de ser o que interessa nesta Dissertação.

Sendo assim, as alterações elaboradas passam por eliminar a *callback receivedata*, visto que esta serve essencialmente para armazenar e reenviar os pacotes, coisa que não será feita, uma vez que a intenção é enviar, no caso de ser possível estabelecer uma rota entre a origem e o destino, um determinado número de pacotes para um veículo específico e medir algumas métricas tais como o atraso, o rácio de entrega de pacotes (PDR) ou o número médio de saltos.

Outro aspecto negativo da implementação inicial prende-se com o facto de os pacotes não serem enviados sobre a camada TCP/IP (o envio era baseado no endereço MAC), nem haver uma implementação de uma configuração de rede próxima do real pelo que, como já se referiu, houve a necessidade de se fazer uma atribuição de IPs (dinâmica) e configurar os protocolos de encaminhamento. Para o envio de pacotes foi criada uma função de raiz baseada em *sockets*, no módulo principal, que será descrita no módulo principal.

- **Novo funcionamento:**

Sendo assim, depois de ter sido feita uma análise de como se processava o envio de informação anteriormente, a segunda função criada neste módulo visa a nova forma de envio de pacotes. Esta função inclui a função de *sockets* que é invocada pela função *controlvehicle* (depois de esta encontrar algum tipo de informação no *buffer* de algum veículo), e uma função existente neste módulo que adiciona um pacote ao *buffer* (incrementa uma lista, o tal *buffer*, exactamente da mesma forma que era feito anteriormente) que será lido, tal como anteriormente, pela função *controlvehicle* que permite depois, dentro do seu corpo, a criação e o envio de um pacote.

Ou seja, cada vez que esta função é invocada, é também invocada uma função que “adiciona” o pacote. No entanto, foi necessário criar também uma função **RemovePacket** de modo a que, da segunda vez que esta função é invocada (esta função é invocada tantas vezes quantas o número de pacotes que se quer enviar) seja removido primeiro o pacote anterior e só depois acrescentado um novo, garantindo-se assim que nunca existe mais do que um pacote no *buffer*. Caso não se garantisse isso, de cada vez que no módulo principal o *buffer* fosse lido, eram criados e enviados o número de pacotes até aí criados e não apenas um, como era pretendido.

3.5.6 Módulo Principal

Nesta subsecção será finalmente descrita a forma como são construídos os cenários, desde o processo de configuração e inserção de veículos e de configuração da auto-estrada, ao controlo de tudo o que se passa com os veículos, desde o seu posicionamento na estrada, à criação e troca de mensagens entre os mesmos.

De seguida, será apresentado um diagrama de blocos que permite sintetizar o que é feito neste módulo.

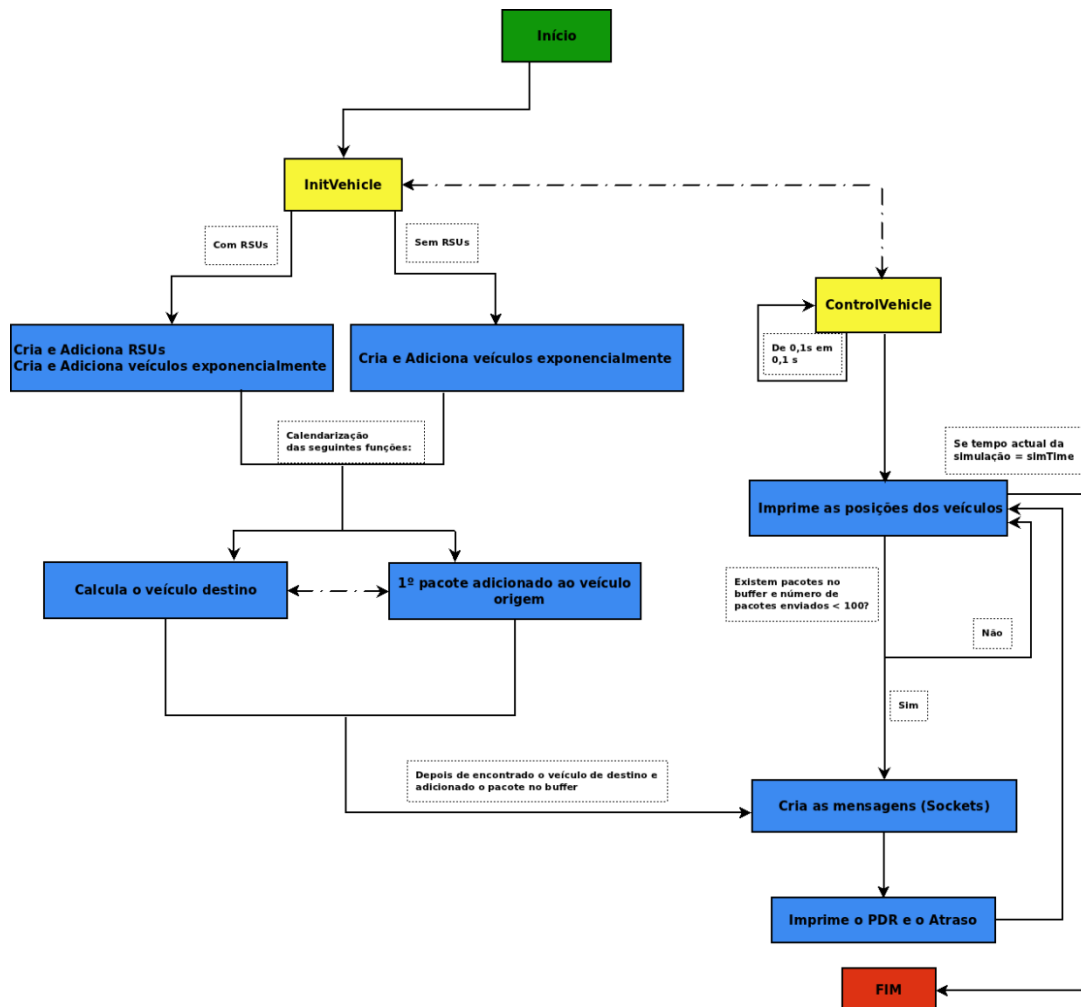


Figura 10, Diagrama de Fluxo do Módulo Principal

Assim, pelo que se pode ver no diagrama, inicialmente a primeira função a correr é a função *callback* **InitVehicle** onde:

- se criam as RSUs (no caso de ser um cenário que envolva infra-estruturas) e/ou os veículos (neste caso, adiciona-se os veículos exponencialmente e os veículos vão sendo adicionados até ao final da simulação);
- se faz uma calendarização (para o instante que se pretender) da função que calcula o veículo de destino para o envio da informação e se invoca, pela primeira vez, a função que adiciona os pacotes (de referir que essa função é recursiva e se vai auto-invocar num total de 100 vezes, o que será explicado mais à frente).

A partir do instante em que a função **InitVehicle** adicionar os veículos à auto-estrada, de 0,1s em 0,1s a função *callback* **controlvehicle** vai imprimir as posições dos veículos e vai verificar se existem pacotes no *buffer* (o que só será verdade depois da calendarização das funções respectivas na função **InitVehicle**). De realçar que só existirão pacotes no *buffer* se o número de pacotes enviados ainda for menor que 100, uma vez que esse é o número de pacotes que se pretendem

enviar nos testes (pois é um valor suficiente que permite tirar conclusões), conforme se explicará aquando da descrição dos cenários.

Se todas estas condições estiverem conjugadas é invocada a função que cria e envia as mensagens e são impressas as métricas necessárias: atraso e PDR. Depois disso, continua a impressão dos veículos. A simulação só termina depois do tempo actual da simulação atingir o valor especificado em “simTime”.

De seguida, explicar-se-á mais detalhadamente os pormenores de cada função.

3.5.6.1 Função Principal

Dentro da função principal vão ser configuradas diversas variáveis, tais como a duração da simulação, ou o período de actualização do cenário. A função principal é ainda o local ideal para a inicialização das funções *callback* (que são as duas funções representadas no diagrama da Figura 10) que permitem realizar alterações em tempo real ao cenário, isto é, que permitem efectuar alterações durante a própria simulação. São estas funções que criam e controlam os veículos/RSUs.

Convém referir que, para tornar as simulações aleatórias, manteve-se a semente igual a 1 e incrementou-se o “RunNumber” consoante o número de simulações [78].

Por fim, é necessário configurar os parâmetros da auto-estrada. Alguns desses parâmetros serão evidenciados de seguida.

Primeiro, cria-se então um objecto que representa a auto-estrada **Ptr<Highway> highway=CreateObject<Highway>()** e, depois, efectua-se as configurações pretendidas:

- **highway->SetLaneWidth (5)** (este valor é fixo e define a largura habitual de uma faixa de rodagem);
- **highway->SetNumberOfLanes (2)** (este valor é dinâmico e vai depender dos cenários que se estiverem a considerar. Define o número de faixas em cada sentido);
- **highway->SetChangeLane (false)** (definida como false pois não serão toleradas ultrapassagens automáticas);
- **highway->SetTwoDirectional (true)** (assume-se como “true”, na maioria das vezes, uma vez que na maioria dos cenários vai existir tráfego nos dois sentidos);
- **highway->SetAutoInject (false)** (definido como “false” de modo a garantir uma densidade constante);
- **highway->SetDeltaT (deltaT)** (definição do tempo de actualização de cada cenário).

3.5.6.2 Função InitVehicle

De forma a tornar mais intuitiva a percepção de tudo o que é feito nesta função, e sabendo que é nesta função que serão inicializados e configurados os veículos e as RSUs, serão primeiro

descritas as funções que são invocadas pela **InitVehicle**, e apenas depois disso será feita uma descrição da função em si. De modo a explicar o caso mais complexo, será abordado um cenário que inclui veículos e RSUs.

3.5.6.2.1 Função CreateRSU

Nos casos em que existem RSUs nos cenários, estas serão as primeiras a ser configuradas. A sua configuração é feita da seguinte forma:

- Configuração do Wi-Fi, invocando a função “**SetupWifi**” existente no módulo **Vehicle**;
- Atribuição de um identificador do veículo (Vehicle ID) em que, para isso, basta verificar o último VID atribuído e incrementar uma unidade a esse valor;
- Definição da direcção (neste caso, como uma RSU não tem mobilidade, é irrelevante, mas como se assume uma RSU como um veículo sem mobilidade, é expectável que se defina uma direcção);
- Definição da sua posição, quer a nível de faixa, quer de posição nessa faixa (neste caso, quando existem RSUs no cenário, assume-se que a primeira faixa mais à direita funciona como a berma da estrada e, portanto, é aí que se inserem as RSUs separadas, cada uma, pelo valor definido na idealização do cenário, e colocadas no centro da faixa, como habitualmente);
- Definição da velocidade e da aceleração (neste caso, como já foi referido, vão ser nulas);
- Definição do modelo de circulação;
- Definição do tamanho e da largura da RSU que, neste caso, é irrelevante (assumiu-se 1m de largura e comprimento).

3.5.6.2.2 Função CreateVehicle

Função usada para criar os veículos, em tudo semelhante à anterior, com a excepção de alguns detalhes que serão explicitados:

- Existência de uma variável booleana “isRSU” que é tornada falsa e é enviada como parâmetro da função que invoca a configuração do Wi-Fi de modo a identificar que se trata da configuração de um veículo;
- Posição inicial do veículo que, em virtude das suas dimensões, se situa na coordenada “-4” de modo a que a parte da frente do veículo coincida com o km 0 de estrada;
- Direcção pode ser definida como positiva ou negativa (neste caso faz toda a diferença);
- Velocidade definida como 30 m/s, embora a aceleração se mantenha a 0m/s² de modo a manter constante a densidade de veículos;

- Tamanho do veículo definido como 4m e largura como 2m;

Tudo o resto se processa como na função anterior pois as RSUs foram definidas como veículos sem mobilidade.

3.5.6.2.3 Função **ExponentialAddVehicles**

Esta função é invocada quando se pretende inserir os veículos. Conforme já foi referido, o objectivo passa por conseguir criar uma distribuição de veículos na estrada aproximada ao que se passa na realidade. Para isso, recorre-se a uma variável aleatória exponencial.

- **Explicação da função `InitVehicle`**

Passando agora para a explicação da função *callback* **InitVehicle**, quando esta é chamada, no caso de ser um cenário com RSUs, chama a função “createRSU” o número de vezes correspondente ao número de RSUs que se defina para o cenário (tem de se atribuir um valor para a posição de cada RSU, que vai depender da distância que se queira entre cada unidade). Depois será invocada a função **ExponentialAddVehicles**, de forma a inserir os veículos na estrada (esta função vai ser invocada tantas vezes quantas as faixas que se pretendam ver preenchidas, uma vez que a função apenas adiciona veículos numa faixa predefinida).

Por fim, como existe o objectivo de se deixar encher a estrada de veículos, calendariza-se para um determinado instante (instante esse que permita ter 10 km de estrada completamente preenchidos com veículos) duas funções, recorrendo, mais uma vez, à função “*schedule*” do NS-3 que tem como objectivo invocar as funções do módulo Highway: “**AddPacket**” e “**vDestino**”.

A função “**AddPacket**”, já mencionada em 3.5.5.1, vai permitir enviar os pacotes. De referir, mais uma vez, que se trata de uma função recursiva que será chamada o número de vezes correspondente ao número de pacotes que se pretenda enviar, pois apenas se pretende enviar um pacote de cada vez.

A função “**vDestino**” vai calcular o veículo localizado à distância a que se pretende enviar o pacote, também ela referida em 3.5.5.1.

3.5.6.3 Função **ControlVehicle**

Esta é a segunda função *callback*. A cada “deltaT” segundos, esta função verifica as alterações que ocorreram na simulação e executa determinadas tarefas que serão relatadas de seguida.

Assim, em primeiro lugar, a cada “deltaT” segundos é impressa a posição de cada veículo (sendo isso importante para, principalmente numa fase inicial, se poderem analisar os *logs* e tirar conclusões sobre o correcto funcionamento). Depois é acedido ao *buffer* de cada veículo, de modo a verificar se existe algum pacote para ser criado. Em caso afirmativo, é então invocada a função que vai criar e enviar os pacotes, através de *sockets*. Caso contrário, continua a impressão da posição dos veículos e a leitura do *buffer* até haver alteração neste último.

3.5.6.4 Funções de Criação, Envio e Recepção de pacotes

Para o envio de mensagens, sabendo que é necessário enviar a informação sobre a camada TCP/IP, de modo a poder testar o efeito dos protocolos de encaminhamento, só será possível através do uso de *sockets*. No NS-3 existem *sockets* UDP e TCP, tal como no mundo real e existem aplicações para envio e recepção de pacotes (“OnOffApplication” no emissor e “PacketSink” no receptor).

Como o objectivo passa por enviar pacotes reais, tentando-nos aproximar ao máximo do que se passa com a realidade, então a escolha recaiu na implementação de *sockets* UDP (pois pretendemos testar o envio por UDP), até porque a segunda hipótese não envia nenhum tipo de conteúdo nas mensagens, pelo que não servia os interesses actuais.

3.5.6.4.1 Função Sock

Esta função foi idealizada com o objectivo de se configurar o emissor e o receptor no sentido de se conseguirem enviar e receber, respectivamente, pacotes enviados por *sockets*.

Pelo meio, configura-se mais uma função *callback* (**ReceivePacket**) usufruindo da possibilidade que a classe *socket* do NS-3 oferece de ter um *callback* associado à recepção de pacotes. Portanto, sempre que um pacote é recebido, a função **ReceivePacket** é invocada e executa as acções necessárias.

Por fim, é invocada a função *GenerateTraffic* para criar e enviar os pacotes.

3.5.6.4.2 Função GenerateTraffic

Conforme foi referido, esta função serve essencialmente para gerar pacotes cujo conteúdo era o próprio número do pacote, de forma a ser possível na recepção de pacotes saber qual era o pacote que tinha chegado. Depois de criado o pacote, este é enviado recorrendo à função de envio (*send*) existente na classe *socket* do NS-3.

3.5.6.4.3 Função ReceivePacket

Conforme já foi referido, esta função é invocada cada vez que é recebido um pacote. Sendo assim, este é o local ideal para fazer todo o tipo de manipulações necessárias para calcular as métricas pretendidas.

Nesta função foi necessário retirar de cada pacote, recorrendo para isso a funções da classe *socket*, informação sobre o endereço do veículo que enviou o pacote e do que recebeu; retirar o conteúdo do pacote; retirar a porta em que foi recebido o pacote. Posteriormente, essa

informação pode ser impressa, o que é importante para, numa primeira fase, garantir que tudo funciona correctamente.

Por fim, as métricas foram obtidas da seguinte forma:

- A nível do PDR, foi-se incrementando sempre uma variável que no final continha o número de pacotes entregues. Essa variável, em conjunto com o número de pacotes enviados que era conhecido à partida, permitiu calcular directamente o PDR, dividindo os pacotes recebidos pelos pacotes totais;
- A nível de atraso, o que se fez foi guardar numa lista, ainda na função `sock`, o tempo em que cada pacote era criado e, já nesta função, `ReceivePacket`, guardar-se o tempo em que era recebido cada pacote, permitindo-se assim calcular o atraso subtraindo os valores;
- A nível do número de saltos é de referir que este era impresso através de uma função existente na classe **Vehicle**, como já foi referido, a partir do momento em que se iniciou o envio de pacotes.

3.6 Conclusão

Este capítulo introduziu o simulador de redes NS-3, o simulador de mobilidade utilizado, e apresentou os módulos e funções que foram aproveitados, modificados, ou criados de raiz.

De uma forma sucinta, de modo a ser possível realizar todos os cenários que se pretendia testar ao longo desta Dissertação houve a necessidade de implementar uma série de alterações e de elaborar de raiz algumas funções nos módulos existentes no simulador de mobilidade usado como base. Para além disso foi necessário criar uma função principal que permitisse gerir os módulos todos e, no fundo, construir os cenários com as características pretendidas.

A nível de novidades que foram precisas introduzir, realça-se o facto de ter sido fundamental projectar uma nova forma de envio de informação (por *sockets*) sobre a camada TCP/IP, implementando-se uma configuração de rede próxima do real, com uma atribuição de IPs dinâmica, e procedendo-se à configuração dos protocolos de encaminhamento. A forma de envio que estava implementada anteriormente funcionava por inundação da rede recorrendo para isso aos endereços MAC dos nós, o que não servia os interesses desta Dissertação. Para corrigir esse problema necessitou-se de introduzir alterações no módulo **Vehicle** onde, nos casos sem RSUs, foi necessário: configurar os protocolos de encaminhamento; inicializar a *stack* de Internet; configurar o Wi-Fi na interface de cada nó; e adicionar, dinamicamente, os IPs a cada nó.

Para o caso em que existem RSUs na estrada, consoante o cenário, e conforme foi explicado ao longo do capítulo também havia a necessidade de configurar uma nova interface de Ethernet ou Wi-Fi.

A nível do módulo **Highway** houve necessidade de se criar uma função que encontrasse o veículo de destino da informação, de forma a automatizar os cenários assim como de se criar uma outra função que adicionasse os pacotes ao veículo fonte que seriam lidos por uma das funções de *callback* do módulo principal.

Por fim, a tal função principal de gestão dos cenários e inicialização dos mesmos, criada de raíz, servia exactamente para: configurar a estrada com todas as características pretendidas; para criar a densidade de veículos pretendida; para introduzir as RSUs (nos casos em que tal era necessário); para inicializar (e gerir) o envio de informação e a mobilidade dos veículos; e, por fim, para permitir o cálculo de todas as métricas pretendidas. As duas funções de callback mencionadas ao longo do capítulo desempenharam um papel vital no correcto funcionamento.

4. Avaliação de Resultados

4.1 Introdução

Este capítulo tem como objectivo descrever os cenários idealizados para realizar todas as experiências necessárias ao desenvolvimento desta Dissertação, e apresentar os resultados obtidos ao longo deste trabalho, com a sua respectiva análise. Sendo assim, a organização deste capítulo passa por fazer uma idealização e descrição de cada cenário, apresentando no final dessa descrição os resultados correspondentes a cada caso, com a devida análise e discussão dos mesmos, de forma a ser possível extrair uma conclusão de todo o trabalho.

Os cenários apresentados podem ser divididos em dois grupos distintos: o primeiro grupo representa os cenários de estrada com infra-estruturas, controlados e especificados para analisar os efeitos de posicionamento de RSUs no tempo de *re-healing*. O segundo grupo diz respeito aos cenários de *auto-estrada*, com vários veículos em ambas as faixas de rodagem, bastante próximo de um cenário real.

A grande diferença entre estes dois grupos é que os primeiros testes representam experiências em cenários específicos e controlados (nomeadamente a nível da quantidade e disposição de veículos e de RSUs), para analisar as melhorias que as infra-estruturas inserem na comunicação entre os veículos, assim como uma avaliação do impacto causado pela distância entre as RSUs e pelo tamanho dos *clusters* nessas mesmas comunicações (a nível de atraso que é o que pretendemos avaliar). Estes resultados serão comparados com resultados de testes experimentais, realizados na estrada, e com resultados teóricos [79].

O segundo conjunto de testes é realizado em ambientes mais próximos da realidade, cujos únicos parâmetros a controlar são o espaçamento entre as RSUs, assim como a densidade de veículos, se bem que este último factor acabará por ser aleatório, na medida em que essa inserção é feita com base numa variável exponencial aleatória. Nestes cenários não se controla o tamanho dos *clusters* nem a separação entre os veículos, e pretende-se medir métricas como o rácio de entrega de pacotes (PDR), o atraso e o número de saltos da comunicação.

4.2 Cenários

4.2.1 Explicação geral dos cenários

Para avaliar a validade dos modelos criados é necessário elaborar uma série de cenários que permitam testar as diferentes métricas referidas na introdução, tais como o atraso na entrega de pacotes, o PDR ou a média de número de saltos na comunicação, em cenários distintos.

Como já foi referido, pretendem-se elaborar cenários que modelem os testes mais específicos realizados na realidade, assim como outro tipo de testes em cenários de auto-estrada, que vão envolver situações com densidades de veículos elevadas e que, à partida, permitirão aos veículos comunicar em qualquer situação. Também serão avaliados cenários em que a densidade de veículos é mais reduzida e, nesse caso, apenas com o auxílio de RSUs será possível estabelecer comunicação.

O objectivo do trabalho passa por testar, em grande escala, o comportamento da rede em diferentes cenários, com os protocolos de encaminhamento instalados. Sendo assim, e apesar do objectivo essencial desta Dissertação não ser o de testar os protocolos de encaminhamento em si, iremos começar os testes em auto-estrada com situações mais simples, de modo a se poder observar que valores de periodicidade dos pacotes *Hello* e *Topology Control* (no caso do OLSR) devem ser utilizados para se poder depois idealizar cenários mais complexos, com o mínimo de perdas possível. Dessa forma, será de certo modo possível analisar a influência dos protocolos de encaminhamento AODV e OLSR. As limitações geradas pelos protocolos serão levadas em conta nos resultados finais.

Apresentando a sequência a ser seguida ao longo do capítulo, em primeiro lugar será efectuado um teste básico com encaminhamento e com um modelo de perdas aplicado. Esse teste passa por medir o tempo de associação em comunicações com apenas um salto e com múltiplos saltos, de forma a poder concluir qual o impacto destes valores. De seguida, serão realizados testes para determinar o tempo que demora a ser estabelecida uma rota entre dois veículos a circular em sentidos opostos, ambos com velocidade de 108 Km/h, e entre uma RSU estática e um veículo a deslocar-se a essa mesma velocidade, de forma a ser possível entender as consequências de, nos cenários de auto-estrada, se perder uma rota e se necessitar uma re-convergência do protocolo. Depois da realização destes cenários serão testados então os cenários com infra-estruturas e os cenários de auto-estrada. Nos cenários em auto-estrada os resultados resultam da média de 100 valores (resultantes dos 100 pacotes enviados) com um intervalo de confiança definido a 95%. De realçar que é feita uma média de 15 simulações diferentes.

Por fim, importa salientar que se definiu o valor de 108 km/h (que corresponde a 30 m/s) uma vez que este valor é frequentemente utilizado em publicações sobre redes veiculares.

4.3 Cenários específicos

Nesta subsecção serão descritos em detalhe os cenários correspondentes aos casos mais específicos que se referiram anteriormente e serão apresentados os resultados destes testes, com a respectiva análise.

- **Teste 1 (Tempo de associação):**

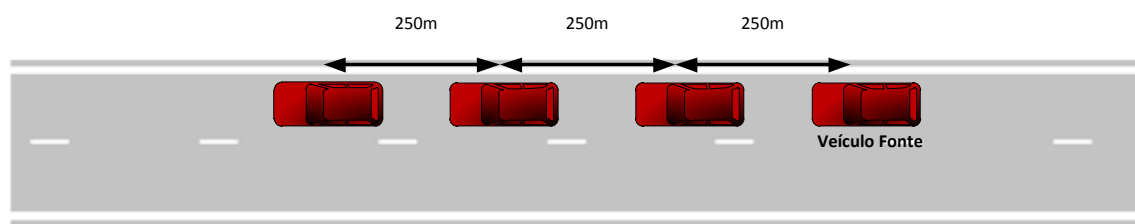


Figura 11, Comunicação multi-salto (tempo de associação)

Este é um teste simples que envolve uma fila de quatro veículos, espaçados de 250m entre eles, à velocidade de 13.89 m/s (50 km/h), servindo o primeiro veículo como fonte de informação e os restantes veículos como destino, possibilitando, assim, comunicações com um salto, dois saltos e três saltos.

Este teste permitirá verificar qual o tempo de associação dos diferentes tipos de comunicação com múltiplos saltos. Como de seguida se pretende estudar o *Re-Healing Time*, este teste também é importante para perceber até que ponto o atraso do tempo de associação pode ser negligenciável face ao *Re-Healing Time*.

	1 Salto	2 Saltos	3 Saltos
Resultados sem encaminhamento [79]	0.49 ms	5.51 ms	15.58 ms
Resultados com encaminhamento	4.5 ms	6.8 ms	23.4 ms

Tabela 2, tempo de associação

Observando os resultados da Tabela 2 podemos verificar que houve um aumento do tempo de associação com o número de saltos, o que acontece devido à existência de transmissão e propagação em cada veículo, com um modelo real de propagação. Os resultados obtidos no âmbito desta Dissertação são mais elevados do que em [79], o que se justifica pelo facto de agora se ter um protocolo de encaminhamento aplicado, assim como o tal modelo real de propagação já referido.

- **Teste 2 (Tempo de convergência dos protocolos de encaminhamento):**

Neste segundo teste, pretende-se medir, em casos em que exista perda de conectividade, qual será o tempo de convergência quer entre veículos em faixas contrárias, quer entre um veículo e uma RSU. A existência de um atraso no cálculo de uma nova rota é um dos motivos que levam à perda de pacotes em cenários de auto-estrada, o que poderá explicar eventuais perdas de pacotes no final das simulações, assim como o aumento do atraso.

Como o objectivo passa por entender mais facilmente os resultados dos cenários em auto-estrada, então a velocidade dos veículos, neste teste, vai ser a mesma que se usa nesses cenários: 108 km/h.

	Veículo-Veículo	Veículo-RSU
OLSR	3.0s	3.0s
AODV	0.9s	0.9s

Tabela 3, tempo de convergência

Analisando os tempos de convergência dos protocolos de encaminhamento podemos concluir que sempre que existe uma perda de ligação, o tempo que é necessário até se estabelecer uma nova rota para o destino e conseguir voltar a enviar os pacotes é particularmente elevado, nomeadamente para o OLSR. No AODV o processo é bastante mais aceitável, mas mesmo assim irá ser significativo para cenários com mobilidade elevada e quebras de ligação frequentes.

4.4 Cenários com infra-estrutura

Estes testes serão comparados com resultados teóricos e experimentais. Todos os testes de simulação realizados nesta subsecção utilizam o OLSR. Neste contexto, serão feitos testes relativos ao *Re-Healing Time* que é o tempo que um pacote demora a ser transmitido na região sem ligação.

4.4.1 Testes de Re-Healing Time

Estes testes servem para se perceber a influência de dois parâmetros específicos no valor de *Re-Healing Time* (que influencia a fiabilidade das comunicações), que são: a distância entre as RSUs e o tamanho dos *clusters* formados na rede. Os *clusters* são grupos de veículos que viajam na mesma direcção e em que cada veículo se encontra dentro do alcance de, pelo menos, um dos veículos seguintes. Isto é, qualquer veículo, para se considerar pertencente a um *cluster*, tem de conseguir atingir qualquer dos restantes veículos desse *cluster*. Os *clusters* de veículos são delimitados por dois veículos: o veículo que encabeça o grupo, que está desligado do veículo que se encontra à sua frente; e o veículo que “fecha” o grupo e que está desligado do veículo que circula atrás dele. Um veículo que não se encontre ligado a mais nenhum outro é considerado um veículo isolado e não constitui um *cluster*.

Geralmente, em redes veiculares, existe a definição clara de *Re-Healing Time* que, no caso de se estarem a testar protocolos de encaminhamento em cenários com muitos veículos (cenários de auto-estrada), deixa de fazer sentido uma vez que o veículo fonte, se não encontrar uma rota até ao destino, não vai sequer chegar a enviar o pacote.

O que acontece em situações sem encaminhamento aplicado é que, mesmo que a determinada altura não seja possível estabelecer uma rota para o destino, o veículo fonte envia o pacote desde que tenha veículos nas imediações (ou armazena ele próprio o pacote no *buffer* até que

tenha algum veículo nas redondezas), sendo que esses veículos que recebem o pacote acabam por o armazenar no *buffer* até conseguirem enviar o pacote para o destino ou para veículos próximos do destino. Este tipo de mecanismo de comunicação é designado por *Store-Carry-Forward transmission*.

A outra hipótese passa por enviar o pacote para uma RSU, localizada nas imediações, possibilitando assim que o pacote seja entregue. O tempo que decorre, desde o instante em que o pacote é enviado pela primeira vez, até que é entregue, é o valor, neste caso, de *Re-Healing Time* acumulado.

Assim, estes testes vão ser realizados em ambientes mais simples, que permitirão tirar conclusões sobre o *Re-Healing Time* em situações em que os veículos estão isolados, para diferentes espaçamentos entre as RSUs e em situações cuja distância entre as RSUs é fixa, mas o comprimento dos *clusters* varia, tal como é feito em [79]. Para isso, o Wi-Fi foi configurado de forma a garantir um alcance máximo de 250m, e configurou-se um modelo real de perdas, com um protocolo de encaminhamento (OLSR) instalado.

- **Teste 1 (RSUs Ligadas, com veículo isolado):**

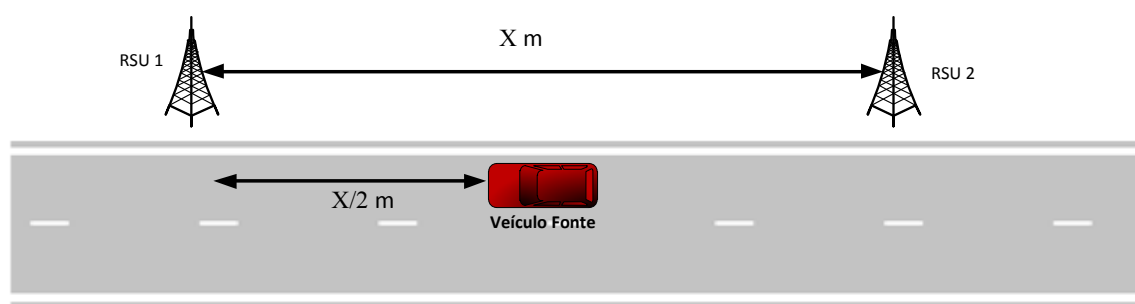


Figura 12, Cenário com RSUs Ligadas (Veículo Isolado)

Neste teste, pretende-se avaliar o valor do *Re-Healing Time* em cenários com um veículo isolado e com o espaçamento entre as RSUs a aumentar, de forma a se poder verificar qual a influência desse espaçamento na qualidade da comunicação. Como se sabe, as RSUs têm um preço elevado, sendo necessário ter em conta o binómio preço / melhoria das comunicações.

Para isso, serão realizados testes com duas RSUs colocadas a uma distância variável, com um veículo isolado a circular na estrada a enviar informação para a RSU2, com a RSU1 a fazer retransmissão dos pacotes. Observando a Figura 12, assumindo as RSUs colocadas a uma distância de 1000m e o veículo fonte a 500m da RSU1, então só será possível enviar um pacote para a RSU2 quando o veículo fonte entrar no alcance da RSU1. O tempo desde que o pacote é criado (o que acontece quando o veículo se encontra, no exemplo citado, a 500m), até ao instante em que este é entregue é o valor de *Re-Healing time*.

- **Veículo com uma velocidade de 108 km/h**

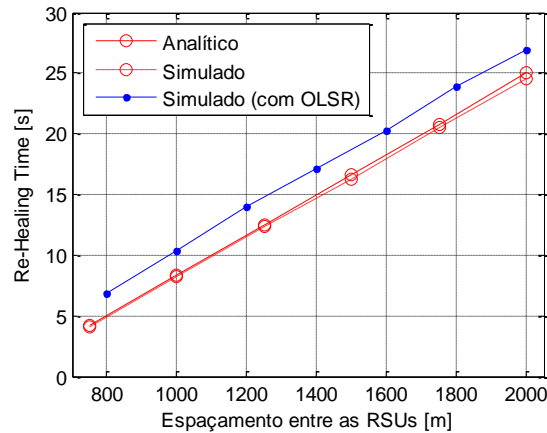


Figura 13, *Re-Healing Time* de um veículo isolado, com RSUs ligadas e veículo a circular a 108 km/h

Comparando as três linhas do gráfico, em que as linhas a vermelho representam o trabalho realizado em [79], e a linha a azul o trabalho realizado nesta Dissertação, pode-se verificar que os resultados são semelhantes, com a ligeira diferença de um aumento de, aproximadamente, 2 segundos, para cada caso medido. Este valor em excesso resulta do tempo de convergência do protocolo de encaminhamento. De realçar que, para realizar estes testes, os valores de periodicidade dos pacotes de *Hello* e dos pacotes de *Topology Control* foram modificados para otimizar o desempenho. É importante verificar que os valores de *Re-Healing Time* aumentam consoante o espaçamento entre as RSUs.

Assim, enquanto que no caso de [79], a partir do momento em que o veículo se encontra dentro do alcance das RSUs existe logo uma troca de pacotes (pois está configurado um modelo sem perdas), neste caso, como existem protocolos de encaminhamento aplicados e um modelo real de perdas, apenas quando se atingem os 250m é possível começar a procura das rotas para o destino. Sendo assim, o envio não é imediato e surge esta variação de 2 segundos que, na prática, resulta do tempo necessário para se estabelecer uma rota.

- **Veículo com uma velocidade de 50 km/h**

A Figura 14 apresenta os resultados do mesmo cenário, mas com veículos a uma velocidade de 50 Km/h. Os resultados incluem os resultados analíticos, resultados experimentais obtidos na *testbed* em Aveiro, e os resultados de simulação. Note-se que no testbed experimental é efectuado o *broadcast* contínuo de pacotes até que estes cheguem ao destino e, por isso, não existe encaminhamento.

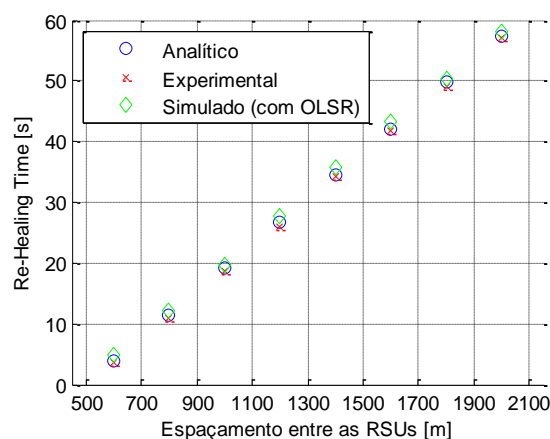


Figura 14, *Re-Healing Time* de um veículo isolado, com RSUs ligadas e veículo a circular a 50 km/h

Mais uma vez, verifica-se um ligeiro aumento do valor de *Re-Healing Time*, devido à utilização de encaminhamento dinâmico. Esse valor está relacionado com o tempo de convergência que, neste caso, é ligeiramente inferior ao da Figura 13 (cerca de 1.5s, em média), em virtude das velocidades serem mais reduzidas, permitindo que o cenário se aproxime mais do tipo de redes para as quais o OLSR foi idealizado (redes com menor velocidade e mobilidade).

Outro aspecto que se pode salientar das duas figuras anteriores é que, em virtude da definição de *Re-Healing Time*, a velocidade a que os veículos se deslocam tem forte influência nesse valor. Daí os resultados serem bastante mais elevados neste cenário em que o veículo se desloca a 50 km/h do que no anterior em que os veículos se deslocavam a 108 km/h. Sendo assim, o valor do *Re-Healing Time* varia com a distância entre as RSUs, com a velocidade dos veículos e com a densidade dos mesmos.

A influência da densidade de veículos (que originará a formação de *clusters*) será abordada de seguida.

Teste 2 (RSUs Ligadas, com veículos a formarem *clusters*):

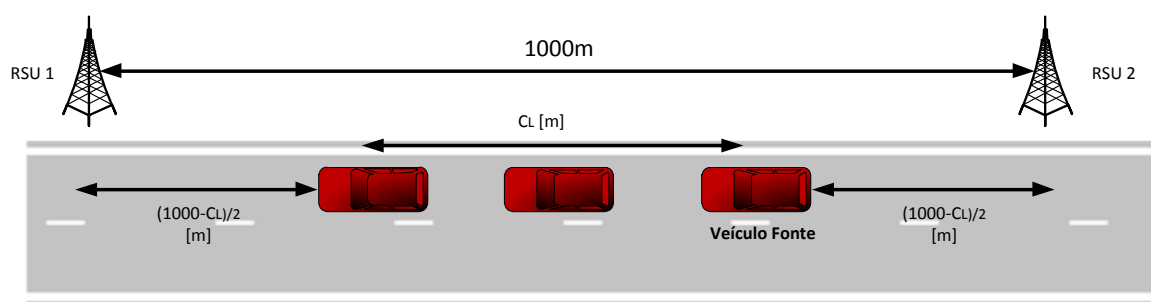


Figura 15, Cenário com RSUs Ligadas (*Cluster* de Veículos)

Este cenário é semelhante ao anterior, sendo que agora, em vez de haver um único veículo isolado, existirão três veículos a formarem um *cluster* com diferentes dimensões (que implica

diferentes espaçamentos entre os veículos), e essas diferentes dimensões corresponderão a diferentes densidades de veículos cujos valores irão desde os 95 aos 345 veh/h¹.

O objectivo deste teste é enviar informação iniciada no veículo localizado na cauda do *cluster* (conforme indica a Figura 15) e verificar que influência terá o *cluster* no valor do *Re-Healing Time*. Em comparação com o cenário anterior, para 1000m, apesar do veículo fonte continuar, aproximadamente, à mesma distância das RSUs, vão agora existir veículos intermédios entre a fonte e o destino, por onde pode ser feita retransmissão dos pacotes, diminuindo assim o *Re-Healing Time*. O objectivo passa, também, por verificar a influência que o comprimento do *cluster* introduz nas comunicações: quanto maior for o comprimento do *cluster*, maior será a densidade de veículos e, portanto, menor será o *Re-Healing Time*.

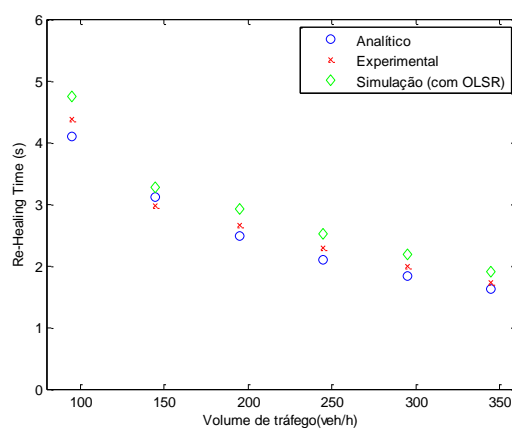


Figura 16, *Cluster de Veículos com RSUs Ligadas - Comparação*

Analisando os resultados da figura pode-se concluir que, com o aumento do tamanho do *cluster* (aumento da densidade de veículos), o valor do *Re-Healing Time* vai decrescendo. Para ser estabelecida comunicação, um veículo tem que estar a 250m da RSU para se conseguirem estabelecer as rotas. Existindo um *cluster* de veículos, o veículo da cauda do *cluster* consegue estar em contacto com a RSU através do veículo da frente do *cluster*, mais rapidamente do que se seguisse isolado. Nesta situação o valor vai diminuir em relação aos resultados com um veículo isolado e, quanto maiores forem as dimensões do *cluster*, mais rapidamente o veículo da frente atinge o alcance da RSU e mais rapidamente se estabelece uma rota.

Analisando os três casos representados na figura anterior, pode-se concluir que existe uma boa aproximação entre os valores teóricos e práticos. Em relação aos valores simulados, como apenas nestes o protocolo de encaminhamento é dinâmico, existe uma diferença de cerca de um segundo, resultante da necessidade de estabelecimento de rotas.

¹ O trabalho em [79] demonstra que o comprimento médio de um *cluster* relaciona-se directamente com a densidade de veículos na estrada.

4.4.1.1 Conclusões

Analisando os três gráficos anteriores podemos verificar que as RSUs interligadas permitem estabelecer as comunicações com um grau elevado de fiabilidade, na medida em que garantem (mediante a disposição das RSUs, ou mediante a densidade de veículos que formam os clusters) valores aproximados, ou inferiores, a 5 segundos.

4.5 Cenários em auto-estrada

Nesta secção serão apresentados cenários de auto-estrada em simulações com o OLSR e simulações com o AODV. Devido ao facto de no NS-3 não ser possível configurar o AODV em interfaces múltiplas (necessário para os cenários de RSUs ligadas), o número de testes envolvendo o AODV será reduzido, servindo apenas de comparação lógica ao OLSR, verificando se se adapta mais facilmente à elevada mobilidade da rede [66] e [80]. Em virtude de ser um protocolo reactivo, será expectável que apresente um valor de atraso superior, uma vez que por cada pacote que se pretende enviar é necessário calcular a rota para o destino.

O foco principal deste trabalho consiste em perceber os benefícios de ter RSUs e esse benefício será maior com as RSUs ligadas entre si, porque assim que a informação chegar a uma das RSUs, passa a estar disponível em todas as outras, atingindo rapidamente todos os outros veículos.

Para se conseguir ligar as RSUs, estas necessitam de ser ligadas por Wi-Fi ou por um cabo de Ethernet. De forma a poder ligar as RSUs sem interferir na comunicação Wi-Fi entre os veículos é necessário configurar duas interfaces. No entanto, o AODV não suporta essa dupla interface pelo que impossibilita, logo à partida, a realização de testes com RSUs ligadas. Com o OLSR não existe qualquer complicação a esse nível.

Sendo assim, a grande divisão dos cenários será entre os que contemplem RSUs e os que não contemplem. Cenários que envolvam RSUs vão ser apenas testados com o OLSR. Cenários sem RSUs serão testados para OLSR e AODV.

De referir que nestes testes em cenários de auto-estrada, os veículos de destino da informação serão escolhidos com recurso à função “**vdestino**”, mencionada no Capítulo 3.

De seguida são apresentados os cenários em particular, começando com uma demonstração de algumas características existentes num cenário de auto-estrada.

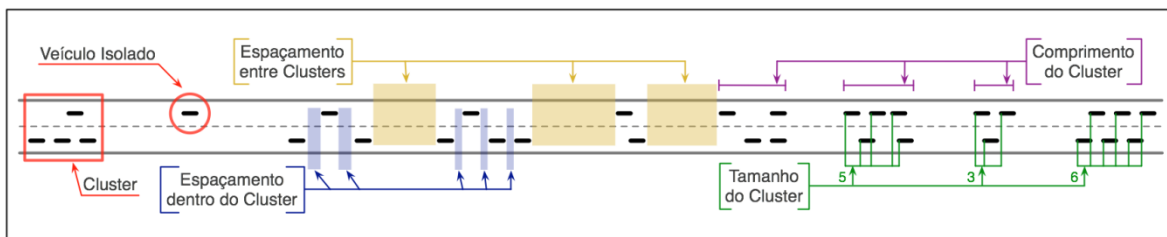


Figura 17, Figura representativa de um cenário em Auto-estrada com diversas características de “sparse networks” indicadas [79]

Na Figura 17 pode-se visualizar um cenário representativo de uma auto-estrada com a rede pouco ligada, onde é evidenciado o espaçamento entre os diferentes *clusters*, implicando que não haja ligação entre eles e tornando necessária a introdução de RSUs para possibilitar a comunicação (supondo que não existem veículos em sentido contrário para fazer retransmissão da informação).

Por fim, uma vez que as métricas que se pretendem medir ao longo deste capítulo são o PDR, o atraso e o número de saltos, de seguida vai-se fazer uma primeira abordagem a essas métricas:

- **PDR**

A nível de PDR, nos cenários cuja densidade é mais elevada, é expectável, no caso de o protocolo de encaminhamento ser adequado para comunicações veiculares, que a percentagem de pacotes entregues seja elevada, principalmente porque o alcance determinado foi de 1000m e as densidades mais elevadas atingem valores de 4 veículos por km pelo que, à partida, resultariam em redes ligadas. No entanto, dado que a inserção de veículos é exponencial, os veículos não se encontrarão todos ligados. O caso máximo de densidade escolhida (cerca de 4 veículos por km) ainda corresponde a uma “Sparse network” representando a densidade aproximada de veículos entre a 1:00h e as 3:00h na “I-80 freeway”, localizada na Califórnia, conforme é referido em [77].

A solução para esse problema poderia passar por aumentar, suficientemente, a densidade de veículos de modo a tornar impossível a ocorrência de lacunas, independentemente da variável exponencial de adição de veículos. No entanto, essa solução não seria viável pois iria aumentar muito a troca de pacotes de estabelecimento e manutenção de rotas dos protocolos de encaminhamento, levando a uma sobrecarga da rede que iria aumentar não só o tempo de simulação, mas que também iria levar a perdas de pacotes.

Outro factor justificativo para a imperfeição nas comunicações está relacionado com os protocolos proactivos, nomeadamente, com o protocolo de encaminhamento OLSR que foi o protocolo utilizado em grande parte dos cenários. Os protocolos proactivos necessitam de manter uma imagem virtual da rede, o que, com as constantes movimentações dos veículos (não só dos que circulam no mesmo sentido mas, principalmente, dos que circulam na faixa contrária), torna impossível manter essa imagem, pois, num determinado instante, um veículo que circule na faixa contrária pode ser usado para fazer encaminhamento de um pacote mas, instantes depois, esse veículo pode já não servir e a rota pode ainda não ter sido eliminada das tabelas de encaminhamento. Esta situação leva a perdas de pacotes visto que serão enviados pacotes por uma rota desactualizada. Esse problema é acrescido nas redes veiculares, em virtude da elevada velocidade de cada nó que faz com que, em breves instantes, um veículo possa entrar e sair do alcance necessário para estabelecer a conectividade da rede.

Uma hipótese para resolver o problema seria reduzir o intervalo de tempo entre os pacotes de *Hello* e *Topology Control* que, como já foi dito, são os pacotes principais no que toca ao estabelecimento das tabelas de encaminhamento. No entanto, tem de existir um compromisso entre o número de veículos na rede e a redução do tempo de emissão desses pacotes, sob pena de, mais uma vez, se gerar um *overhead* excessivo do protocolo de encaminhamento que leva, também ele, à perda de pacotes.

Sendo assim, é claro que nunca se vai conseguir obter um resultado perfeito sendo necessário verificar quais os valores que permitem obter uma maior taxa de sucesso, o que será apresentado no subcapítulo seguinte. Posto isto, os factores que poderão ser avaliados são os seguintes:

- Coerência entre o número de pacotes entregues e a variação da distância entre o veículo fonte e o veículo destino: com o aumento da distância é suposto ocorrer uma diminuição do número de pacotes entregue na maioria dos cenários, uma vez que o número de veículos inseridos na comunicação é maior e isso vai aumentar a probabilidade de perdas, porque é mais complicado manter uma imagem da rede com o número de veículos envolvidos a aumentar. A excepção mais clara a este ponto são os cenários com RSUs ligadas, nos quais deve ser indiferente a distância desde que o espaçamento entre elas seja inferior a 2000m. Os casos pontuais serão descritos de seguida;
- Coerência entre a percentagem de entrega de pacotes e os cenários. Os cenários com RSUs ligadas devem ter um desempenho superior;
- Binómio “Distância entre as RSUs ligadas vs Sucesso na entrega dos pacotes”;

Por fim, é de realçar que poderão existir situações em que, devido à disposição das RSUs, pode fazer sentido que sejam entregues mais pacotes em veículos separados por 6000m do que em veículos separados por 4000m. A justificação prende-se com a possibilidade de existirem RSUs próximas do veículo de destino (no caso em que a distância é de 6000m), mas o mesmo não suceder para veículos separados por 4000m. No entanto isso são casos que ocorrerão apenas em determinados cenários que serão devidamente evidenciados aquando da análise de resultados. O caso mais frequente é precisamente o mencionado, em que a entrega de pacotes diminui com o aumentar da distância.

- **Atraso**

A nível de atraso também se pode fazer uma breve apreciação em relação ao que seria suposto acontecer. Posto isto, algo que se justifica que aconteça é um aumento do atraso com o aumento da distância entre a fonte e o destino.

Por outro lado, uma vez que com o aumentar da densidade aumentam o número de veículos que trocam pacotes de criação e manutenção das tabelas de encaminhamento, é expectável que estes testes tenham um atraso superior.

- **Número de saltos**

Por fim, a nível de número de saltos pretende-se fazer uma avaliação no sentido de perceber a influência que estes podem introduzir nas comunicações. À partida, o que se pode prever é que, aumentando a distância, aumente também o número de saltos, e que os cenários com RSUs ligadas, pelo menos com distância entre as RSUs inferior a 2000m, tenham um valor cons-

tante de número de saltos, uma vez que a comunicação é estável. O valor do número de saltos, nesse caso, é previsível no sentido em que o percurso dos pacotes vai ser o seguinte: do veículo fonte para uma RSU; dessa RSU para a RSU mais próxima do destino (uma vez que estão todas ligadas por Ethernet); e, por fim, dessa RSU para o veículo de destino. Dessa forma, o número de saltos deverá ter sempre o valor de 3.

É de referir que os valores do número de saltos foram calculados ao longo de 20 segundos de envio de pacotes (100 pacotes enviados com um espaçamento de 0,2s entre cada um). No entanto, os valores apresentados representarão a variação do número de saltos em virtude das diferentes densidades. O intervalo de confiança acaba por nos dar, então, uma noção se houve grande variação ao longo do tempo.

Um último aspecto, referente ao número de saltos, é que estes não nos dão nenhuma informação sobre a qualidade da ligação pois é diferente os pacotes serem encaminhados apenas entre veículos, ou entre veículos e RSUs.

4.5.1 Testes de configuração das mensagens do OLSR

A tabela seguinte representa a média do PDR de 20 simulações com um intervalo de confiança a 95%. Estes resultados são importantes na medida em que nos permitem definir a periodicidade da repetição das mensagens de *Hello* e de *Topology Control* de modo a otimizar o funcionamento do protocolo de encaminhamento. De referir que estes testes foram realizados enviando os pacotes em cenários com duas faixas, com o veículo fonte e destino separados por 4000m (posicionados na mesma faixa).

	HT=2.0 TC=5.0	HT=1.0 TC=1.5	HT=2.0 TC=2.5	HT=2.0 TC=1.5	HT=1.0 TC=2.5	HT=1.0 TC=5.0
Média do PDR	50.5±4.75	44.5±5.38	54.9±6.08	52.85±4.88	45.3±6.50	46.8±6.17

Tabela 4, Diferentes testes aos valores da periodicidade dos pacotes *Hello* e *Topology Control*

Observando os resultados da Tabela 4 é possível concluir que os valores a ser usados nos cenários de auto-estrada serão de 2 segundos para a periodicidade dos pacotes *Hello* (HT) e de 2.5 segundos para o *Topology Control* (TC), pois estes são os valores que apresentam um rácio de entrega de pacotes mais elevado.

4.5.2 Cenários sem RSUs

Este tipo de cenários apresenta situações com uma e duas faixas de rodagem que serão distinguidas de seguida.

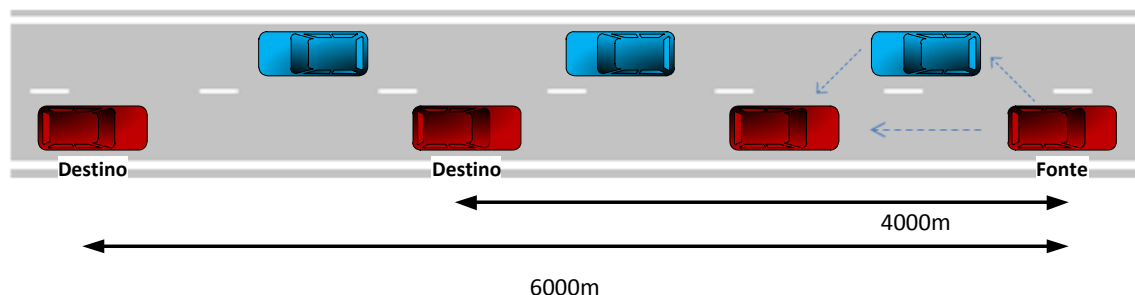


Figura 18, Cenário de Auto-estrada, sem RSUs

- Uma faixa de rodagem

Este primeiro caso serve apenas para demonstrar que o grande problema para o decréscimo na entrega de pacotes está nos veículos que circulam na faixa contrária à faixa onde decorre o envio do pacote, pois com os veículos de ambas as faixas a deslocarem-se a 108km/h existe um afastamento muito rápido entre os mesmos, tornando obsoletas as rotas calculadas e levando à necessidade de uma re-aquisição de rotas, com consequente perda de pacotes.

	PDR	I.C. PDR	Atraso	I.C. Atraso
4000 sem RSUs OLSR	80,1538	9,9383	17,9771	6,7570
4000 sem RSUs AODV	92,3571	8,9815	31,8116	22,0055
6000 sem RSUs OLSR	62,2727	11,9572	40.7787	16.2622
6000 sem RSUs AODV	89	9,2818	38,5017	20,8120

Tabela 5, Resultados de cenários com apenas 1 faixa, com a densidade de, aproximadamente, 4 veh/km

Os resultados da Tabela 5 permitem testar o funcionamento dos protocolos em cenários com apenas uma faixa de rodagem.

Avaliando os resultados, verifica-se que o valor do PDR pode ser considerado elevado em ambos os protocolos. À partida, este desempenho, para apenas uma faixa de rodagem, será superior aos cenários com duas faixas em que a velocidade relativa entre os veículos que circulam em sentidos opostos acaba por ter um efeito negativo na convergência da tabela de encaminhamento dos protocolos.

De realçar que, como esperado, o OLSR apresenta um tempo de atraso menor, mas também apresenta um PDR mais baixo quando comparado com o AODV. No entanto, com o aumento da distância entre a fonte e o destino, essa melhoria no atraso desvaneceu-se o que pode indicar que, com o aumento de veículos envolvidos no cálculo das rotas, neste caso, o AODV tem um comportamento mais consistente. Esse aumento do atraso no OLSR deve-se ao facto de, neste caso, este ter recalculado as rotas mais vezes.

- **Duas faixas de rodagem**

Neste cenário pretende-se iniciar os principais testes desta Dissertação, em situação de auto-estrada, envolvendo mais veículos. Estes testes permitirão tirar conclusões acerca da importância que as RSUs têm na melhoria da comunicação entre veículos, em cenários muito próximos da realidade.

No primeiro cenário, preenchem-se 10km de estrada (tamanho total de 13Km) com uma determinada densidade (neste caso serão usadas cinco densidades diferentes que vão desde 1 a 4 veículos por km). Assim que o primeiro veículo atingir os 10km, enviam-se 100 pacotes, com um espaçamento de 200 milissegundos entre cada pacote (taxa de 5 pacotes por segundo), para um veículo situado a 4000m de distância e localizado na mesma faixa. No segundo cenário aumenta-se a distância fonte-destino para 6000m. Estes exemplos podem ser observados na Figura 18.

Como em ambos os testes não existem infra-estruturas e os veículos vão ser introduzidos por uma variável aleatória exponencial, que modela o fluxo de tráfego na vida real, então sempre que surgirem lacunas vão irão ser perdidos pacotes. É de salientar que o facto de se ter, na situação máxima, 4 veículos por km não invalida que apareçam lacunas, pois esses 4 veículos num primeiro km podem estar todos muito próximos entre si, mas muito afastados dos 4 veículos seguintes.

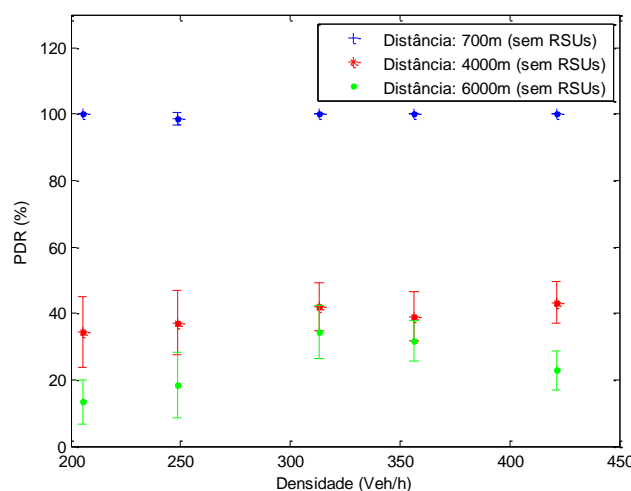


Figura 19, PDR para cenários sem RSUs, com 2 faixas

No exemplo da Figura 19, para o caso em que distância entre a fonte e o destino é de 700m, como o alcance dos veículos é de 1000m, verifica-se uma comunicação com apenas um salto, pelo que a entrega de pacotes é total. Os valores que não são exactamente 100% devem-se ao facto de a distribuição de veículos ser exponencial e poder ocorrer uma ou outra simulação em que não existam veículos separados por menos de 1000m, deixando a comunicação de ser feita através de um único salto e havendo, assim, uma alteração ligeira nos resultados.

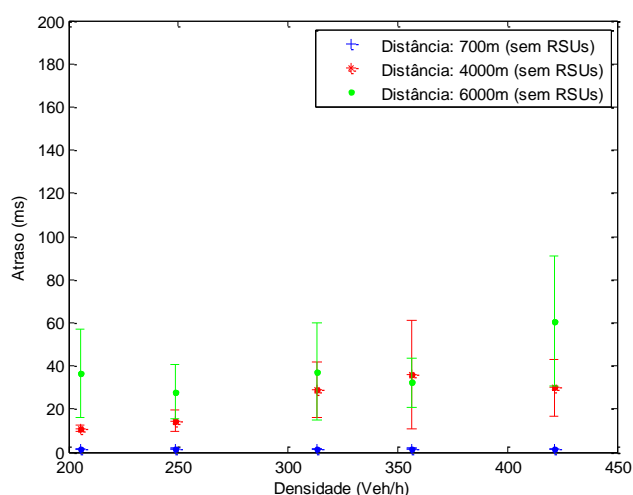


Figura 20, Atraso para cenário sem RSUs, com 2 faixas

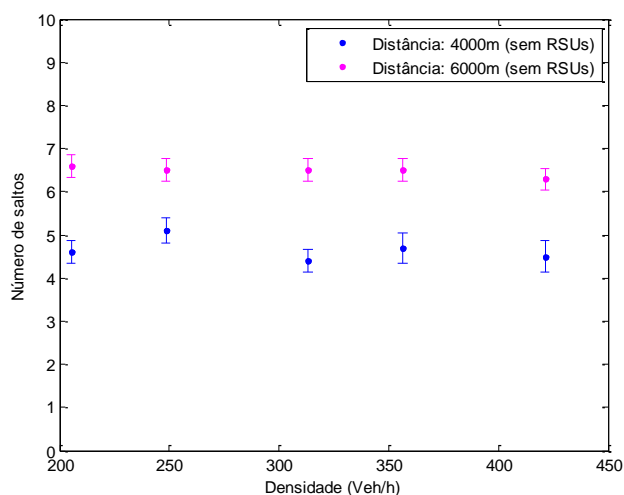


Figura 21, Número médio de saltos em cenários sem RSUs

Nos restantes dois casos representados, a comunicação passa a ser efectuada por múltiplos saltos. Devido à constante mobilidade dos veículos da faixa contrária, as tabelas de encaminhamento têm mais dificuldade em ser construídas pelo que, mesmo nas situações com maior densidade de veículos, em que haveria sempre ligação, a entrega de pacotes é mais baixa.

Apesar de tudo os resultados são coerentes, na medida em que o desempenho diminuiu claramente com o aumento da distância. Para distâncias maiores entre a origem e o destino, nas densidades mais elevadas, já se nota um decréscimo no número de pacotes entregues, fruto das perdas que ocorrem com a distância. De realçar que no OLSR, como existe uma imagem virtual da rede, o *overhead* não aumenta com a distância, apesar do maior número de veículos envolvido. No entanto, quanto maior for a distância, mais veículos existem envolvidos no envio de pacotes e mais difícil se torna manter a imagem da rede com as ligações actualizadas pelo que ocorrem mais perdas.

Analisando a Figura 20 verifica-se que, no caso em que existe uma separação fonte-destino de 700 metros, como se tratam de comunicações de apenas um salto, o atraso é muito reduzido, podendo-se considerar que acaba por ser apenas o valor do tempo de associação dos veículos. Nos restantes dois casos já tem de se contabilizar não só o tempo de associação, como o próprio tempo de determinação de rotas e de encaminhamento dos pacotes.

Como se pode verificar o atraso aumenta com a distância, embora nalguns casos essa diferença não seja tão evidente, pois o aumentar da distância entre a fonte e o destino para 6000m faz com que o protocolo de encaminhamento funcione de forma menos eficaz. Como se pode verificar existem alguns valores de intervalos de confiança elevados que resultam do facto de, com o variar das simulações, os veículos serem dispostos de maneira diferente e, por vezes, em determinadas disposições de veículos (diferentes simulações) ocorrerem perdas e reaquisições de rotas que fazem variar drasticamente o valor do atraso (geralmente entre a perda de ligação e o restabelecimento da rota chegam três pacotes com atraso de 1s, 0.8s e 0,6s, respectivamente, e apenas depois disso se restabelece a comunicação). São esses valores que acabam por adulterar os resultados e originar intervalos de confiança significativos o que não é possível de prever pois depende da distribuição dos veículos. Uma solução para minimizar esse problema passaria por aumentar significativamente o número de simulações e tirar a média dos resultados, tal como é justificado pelo teorema do limite central [81]. No entanto, não foi possível fazer isso durante esta Dissertação devido ao elevado tempo que cada simulação demora a ser realizada (neste caso definimos um valor de 15 simulações distintas, conforme já foi referido, que acaba por ser o suficiente para tirar conclusões sólidas). Assim, temos de ter em conta esse factor nas análises efectuadas.

Relativamente ao número de saltos, o que seria de prever, sabendo que o alcance de cada veículo é de 1000m, é que para a distância fonte-destino de 4000m se registassem, aproximadamente, 4 saltos e para a distância fonte-destino de 6000m se registassem, aproximadamente, 6 saltos. Acontece que, muitas vezes, existem lacunas ao longo do cenário e há necessidade de recorrer a veículos que circulem na faixa contrária para encaminhar os pacotes, acabando por aumentar assim o número de saltos. Essa variação está dependente da distribuição dos veículos imposta pela função exponencial. Analisando os resultados da Figura 21, podemos concluir que se verificou exactamente o previsto, com algumas variações que dizem respeito quer às diferentes densidades, quer à distribuição imposta na criação dos veículos.

4.5.3 Cenários com RSUs

De seguida vamos introduzir cenários com RSUs dispostas na estrada.

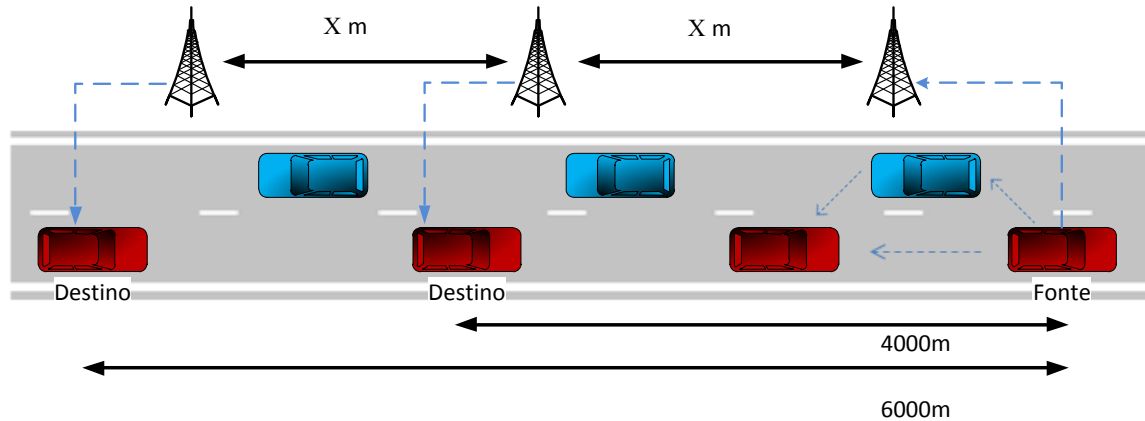


Figura 22, Cenário de Auto-estrada, com RSUs

4.5.3.1 Cenário com RSUs desligadas

Neste caso, em primeiro lugar, deve ser realçado que vão ser adicionadas RSUs ao cenário anterior.

Nos testes sem protocolos de encaminhamento, como se pode ver em [79], as RSUs desligadas acabam por influenciar as comunicações, nomeadamente o valor de *Re-Healing Time*, porque se um veículo pretender enviar a informação para um determinado destino que esteja fora de alcance, pode enviar para uma RSU (no seu alcance), cabendo a essa RSU armazenar o pacote até o veículo de destino entrar no seu alcance para lho enviar. Desta forma, com *store-and-forward*, as RSUs desligadas conseguem garantir a entrega de pacotes, mesmo que exista um aumento do tempo de entrega.

No entanto, sem o processo de *store-and-forward* e com os protocolos de encaminhamento configurados, a situação de uma hipotética melhoria nas comunicações deixa de ter significado por dois motivos. Primeiro, não existe a possibilidade de, no caso de não ser possível estabelecer uma rota para o destino, enviar o pacote para uma RSU que o armazene até o veículo de destino se encontrar dentro do alcance da RSU já que o veículo fonte apenas envia o pacote quando é conhecida uma rota para o destino. Por outro lado, nos casos em que se estabelece uma rota que inclua essas RSUs, existe um problema, porque os veículos estão em movimento (com velocidade de 108km/h) e a RSU está estática. Desta forma, uma rota que num determinado instante seja válida, pode facilmente deixar de o ser porque, com a movimentação dos veículos, rapidamente uma RSU que estava no alcance, pode deixar de estar e acaba por se perder a “ligação” a essa RSU que fazia parte da rota, havendo necessidade de re-convergência de rotas, criando um efeito desestabilizador nas comunicações. No entanto, existem benefícios nos casos em que sem RSUs não é possível estabelecer uma rota mas que, com a inserção destas, mesmo que

momentaneamente, isso se torne possível. O balanço entre estas duas situações acaba por permitir uma analogia ao cenário sem RSUs.

De realçar que, se mesmo com a introdução das RSUs as rotas continuarem a ser criadas apenas com o recurso a veículos, então a situação acaba por ser semelhante ao cenário sem RSUs.

A nível de projecção dos cenários, a ideia é a mesma do caso anterior: testar o envio de informação para duas distâncias diferentes entre a fonte e o destino (4000 e 6000 metros), mas neste caso com RSUs desligadas inseridas na estrada. Um exemplo do cenário pode ser observado na Figura 22.

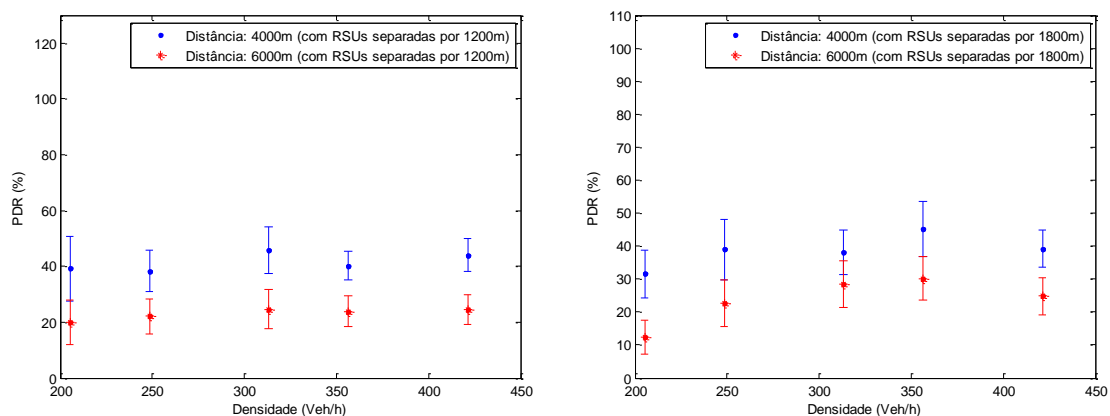


Figura 23, PDR para cenário com RSUs desligadas, com 2 faixas

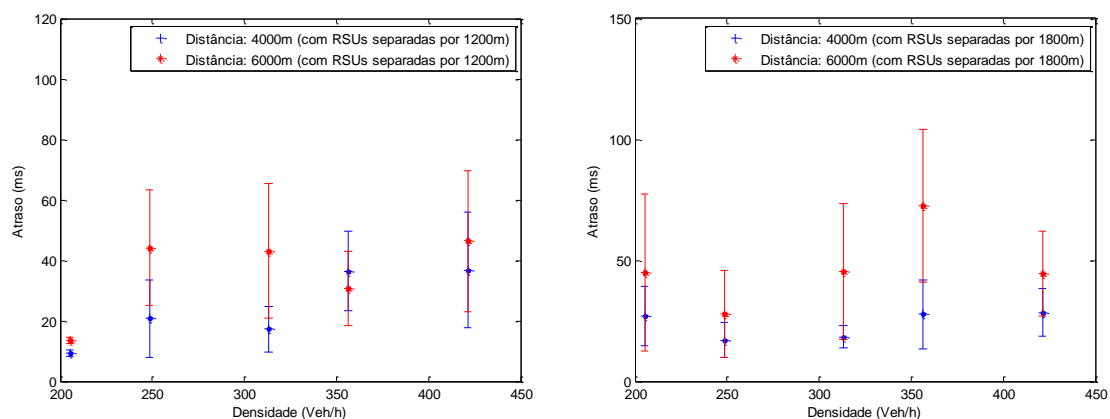


Figura 24, Atraso para cenário com RSUs desligadas, com 2 faixas

A inserção de RSUs desligadas e separadas por um valor superior a 1000m não é mais do que a inserção de mais um veículo no cenário, com a diferença de que este “veículo” tem a sua posição pré-determinada à partida e está estático. Sendo assim, pelas razões apresentadas anteriormente é normal que não apareçam melhorias significativas.

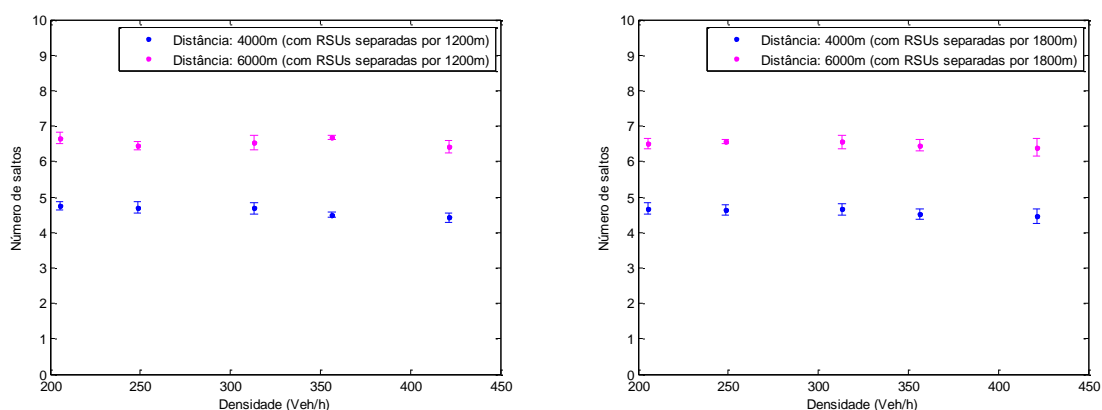


Figura 25, Número médio de saltos em cenários com RSUs desligadas

O que se pode concluir da inserção de RSUs desligadas, analisando os resultados da Figura 23 (no caso em que as RSUs se encontram separadas por 1200m, para ambas as distâncias fonte-destino testadas) é que a densidade mais elevada não apresenta melhorias comparativamente ao cenário sem RSUs, uma vez que, em virtude do número de veículos ser relativamente elevado, não houve necessidade do cálculo de novas rotas para entregar os pacotes. A densidade mais baixa foi a que registou melhores resultados o que, devido ao número de veículos ser mais reduzido, faz sentido pois, neste caso, a presença das RSUs em determinadas posições fechou lacunas existentes e, dessa forma, levou a um ligeiro aumento da conectividade da rede.

Nas densidades centrais, para 4000m de distância entre a fonte e o destino, as alterações não foram significativas. Mais uma vez, aceita-se que a inserção das RSUs não tenha melhorado, a nível de custo, o caminho entre a origem e o destino, pelo que não houve alteração substancial nas rotas e o resultado é semelhante. Para 6000m de distância entre a fonte e o destino já se nota um ligeiro decréscimo que pode ser explicado pelo facto de a distribuição dos veículos não ser uniforme ao longo de toda a estrada (ou seja, o facto de nos primeiros 4km não ter havido a necessidade de recorrer às RSUs para o cálculo de novas rotas, não implica que nos restantes 2 km não ocorra o cálculo de novas rotas) e ter-se justificado, assim, o uso de novas rotas, com consequente diferença nos resultados.

Olhando de novo para a Figura 23, mas agora para o caso em que as RSUs se encontram separadas por 1800m, a análise acaba por ser em tudo semelhante à das RSUs separadas por 1200m, com a agravante de que, quanto mais afastadas estão as RSUs, menor vai ser o efeito (mesmo que pequeno) de melhoria na ligação da rede.

Falando agora do atraso, analisando a Figura 24 (nomeadamente o caso em que as RSUs se encontram separadas por 1200m) é possível verificar o que se previa inicialmente, isto é, a nível de valor de atraso as alterações não são significativas, comparando com os casos em que não existem RSUs.

Ao observar os resultados (principalmente com 4000m de distância entre o destino e a fonte) é notório que as situações acabam por ser semelhantes, à excepção da segunda e da terceira densidades, o que pode resultar do facto de ter havido uma maior variação das rotas nestes dois casos, quando comparados com o cenário sem RSUs. A nível de intervalos de confiança, houve uma ligeira melhoria. Para 6000m de distância a variação foi superior. Estes resultados expli-

cam-se pelo facto de, consoante se aumenta a distância entre a fonte e o destino, mais elevado passa a ser o número de veículos envolvidos no estabelecimento das rotas e maior se torna o *overhead* levando a uma menor fiabilidade das rotas. Sendo assim, é possível que, com a inserção de RSUs, essa situação possa ser ainda mais agravada e os valores sejam mais díspares, pois foram usadas mais RSUs no estabelecimento das rotas do que no caso de 4000m. As RSUs não têm, de facto, um efeito estabilizador.

Com a inserção de RSUs a 1800m de distância umas das outras, o que se pode verificar é que essa inserção acabou por não beneficiar o cálculo das rotas, porque na maioria dos casos aumentou quer o próprio atraso, quer os intervalos de confiança, o que pode indicar que houve mais perdas de rotas, com respectiva necessidade de restabelecimento das mesmas.

Comparando com o caso sem RSUs (em que os resultados já não eram satisfatórios, o que remete para uma dificuldade em estabelecer rotas para o destino) se ao número reduzido de rotas aí estabelecidas, ainda acrescentarmos um factor instável como as RSUs desligadas (essa instabilidade resulta de estas terem uma posição fixa, ao contrário dos veículos), espera-se que haja uma variação considerável no intervalo de confiança entre os dois casos, pois haverá necessidade de recalcular as rotas mais vezes. Esta situação é válida quer para as RSUs separadas por 1800m, quer para as RSUs separadas por 1200m.

Tentando fazer um paralelismo entre os casos em que as RSUs se encontram separadas por 1200m e os casos em que as RSUs se encontram separadas por 1800m, verifica-se que tal não é possível pois não existe um padrão, podendo as RSUs ser mais ou menos usadas para o estabelecimento das rotas em virtude quer da sua distribuição, quer da densidade dos veículos.

Em relação ao número de saltos, analisando os resultados da Figura 25, pode-se verificar que os valores não são muito distintos do cenário sem RSUs (nem o contrário seria expectável), com a diferença que a variação acaba por ser mais regular em virtude de existirem mais nós na rede que garantem uma maior estabilidade.

Como já se observou nas métricas anteriores, o facto de as RSUs desligadas melhorarem a conectividade, com maior estabilidade no número de saltos, não implica um melhor rácio de entrega de pacotes ou uma melhoria no atraso, pois o número de saltos não nos dá indicações sobre a qualidade das ligações.

Como balanço final, relativamente a RSUs desligadas, com o protocolo de encaminhamento OLSR, verificou-se que estas acabam por não ter utilidade, tendo mesmo um efeito algo destabilizador.

4.5.3.2 Cenário com RSUs Ligadas

Os cenários com RSUs ligadas dividem-se em dois tipos: RSUs ligadas por Wi-Fi e RSUs ligadas por Ethernet.

1. RSUs Ligadas por Ethernet

Quando as RSUs estão ligadas por Ethernet, assim que a informação atinge uma RSU acaba por estar disponível em todas as outras após o tempo de transmissão e propagação na Ether-

net. Sendo assim, mediante a distribuição das RSUs, é possível garantir uma cobertura total de toda a estrada com PDRs de 100% e atrasos mínimos. Particularizando, no caso de a distância entre as RSUs ser inferior ou igual a 2000m, como o alcance de cada RSU é de 1000m, então os pacotes acabam por ser todos entregues. O funcionamento do processo é simples de explicar, porque o veículo de origem envia o pacote para a RSU que estiver mais perto e esta envia para a RSU que estiver mais próxima do destino que, finalmente, envia para o veículo de destino. Em 3 saltos, o pacote vai da origem ao destino.

Nos casos em que o espaçamento das RSUs for superior a 2000m, já haverá a necessidade de ser feito encaminhamento dos pacotes, não só da parte das RSUs, mas também dos veículos, começando a ocorrer perdas pelos mesmos motivos que têm vindo a ser evidenciados anteriormente, isto é, pelo facto dos protocolos de encaminhamento, aplicados a redes veiculares, não funcionarem perfeitamente e das lacunas que surgem devido à inserção exponencial.

Sendo assim, os resultados vão ser separados para casos em que a distância entre as RSUs é inferior a 2000m e casos em que a distância entre as RSUs é superior a 2000m.

- **Distância entre as RSUs inferior a 2000m**

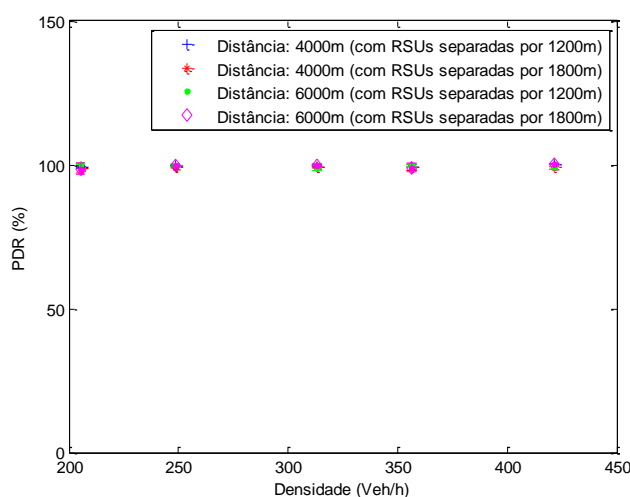


Figura 26, PDR para cenários com RSUs ligadas por Ethernet, com 2 faixas

Analisando a Figura 26, verifica-se que as RSUs permitem manter ligada toda a rede, independentemente da distância entre a fonte e o destino ou da separação das RSUs, e o número de pacotes entregue, qualquer que seja a altura do envio de pacotes, será sempre máximo. Este facto era de esperar pois, a partir do momento em que uma das RSUs recebe o pacote para fazer encaminhamento, este acaba por estar disponível em todas as outras RSUs, em virtude de estas estarem ligadas umas às outras. Deste modo, torna-se possível atingir qualquer destino.

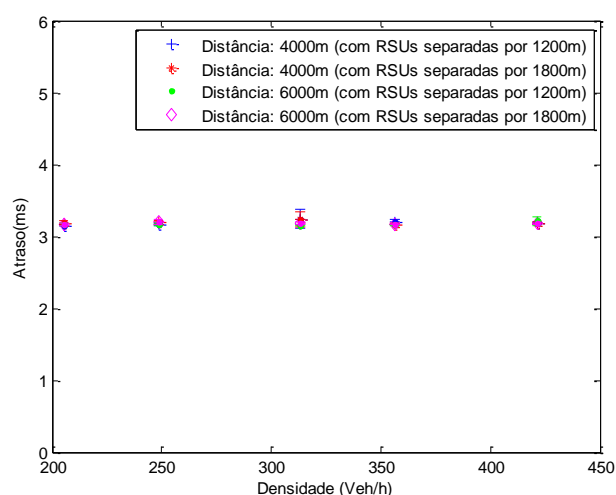


Figura 27, Atraso para cenários com RSUs ligadas por Ethernet, com 2 faixas

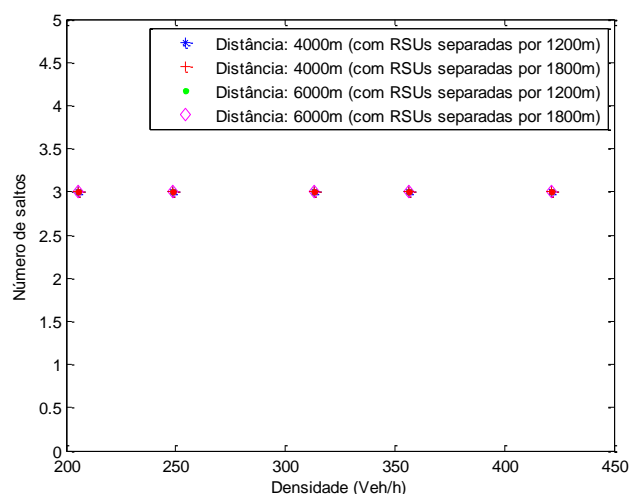


Figura 28, Número de saltos para cenários com RSUs ligadas por Ethernet, com 2 faixas

Em relação ao atraso, como se pode verificar pelos resultados obtidos quando temos as RSUs ligadas por Ethernet, esse valor é sensivelmente igual para qualquer distância ou separação entre as RSUs. Assumindo como ideal a comunicação entre as RSUs, o valor do atraso acaba por ser apenas o tempo de associação, em conjunto com o tempo de encaminhamento dos pacotes, levando a que resultados sejam aproximadamente iguais, independentemente do espaçamento (desde que esse espaçamento seja inferior a 2000m).

Ao contrário dos casos vistos anteriormente, neste cenário apenas é necessário haver associação entre o veículo de origem, as RSUs e o veículo destino, sendo mais rápido o processo e diminuindo significativamente o atraso.

Como se pode ver na Figura 27, a inserção de RSUs ligadas no cenário acaba não só por diminuir, como também por estabilizar o atraso.

Por fim, relativamente ao número de saltos, observando a Figura 28, o que podemos concluir é que, nos casos das RSUs ligadas a uma distância de 1200m e 1800m, na sequência do que já foi dito, a comunicação é estável e tem o valor de 3 saltos, independentemente da distância fonte-destino

- **Distância entre as RSUs superior a 2000m**

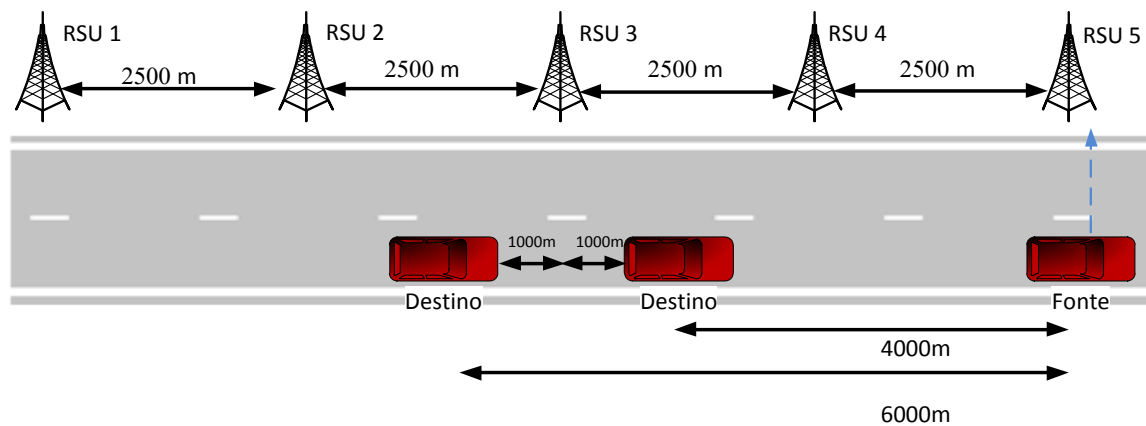


Figura 29, Esquema representativo das RSUs separadas por 2500m

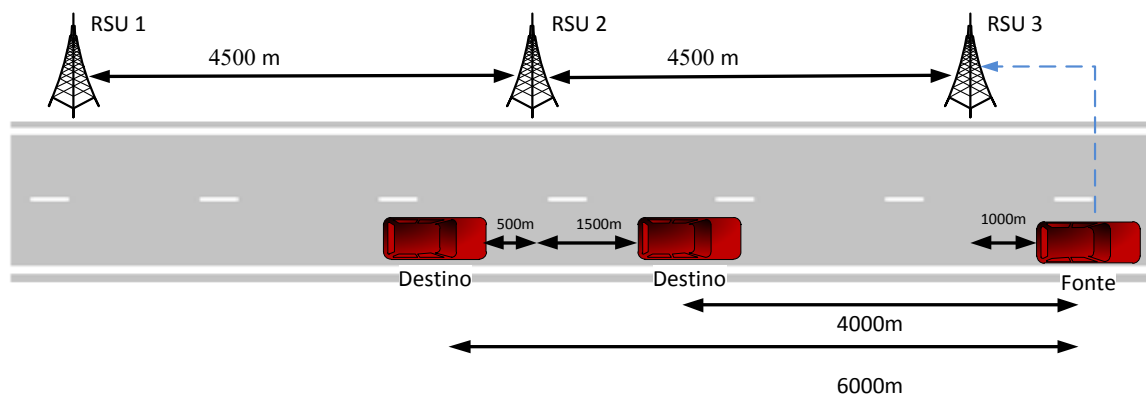


Figura 30, Esquema representativo das RSUs separadas por 4500m

Na Figura 29 e na Figura 30 podem ser vistos esquemas do posicionamento das RSUs e dos veículos fonte e destino (quer para 4000m de distância entre eles, quer para 6000m) no início do envio dos pacotes. Desta forma, pretende-se deixar claro o funcionamento da troca de informação entre os veículos. Estas duas figuras servirão também como auxílio da explicação dos resultados que se apresentarão de seguida. Na figura encontra-se indicada, em cada veículo, a distância a que este se encontra da RSU mais próxima e é de referir que não se representa o fluxo de veículos, pois o objectivo passa apenas por clarificar o posicionamento das RSUs e dos veículos fonte e destino.

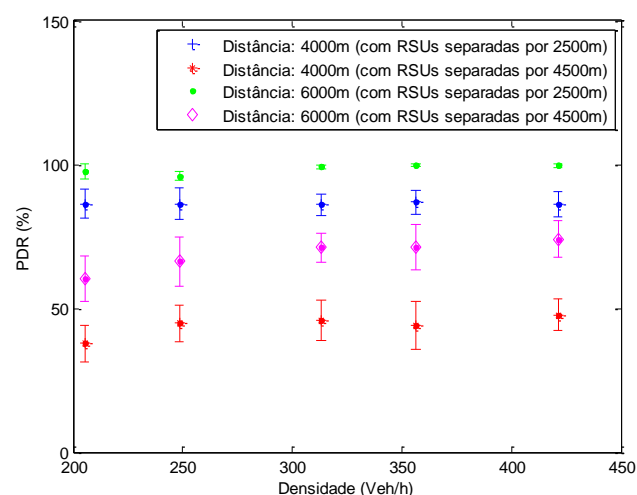


Figura 31, PDR para cenários com RSUs ligadas por Ethernet, com 2 faixas

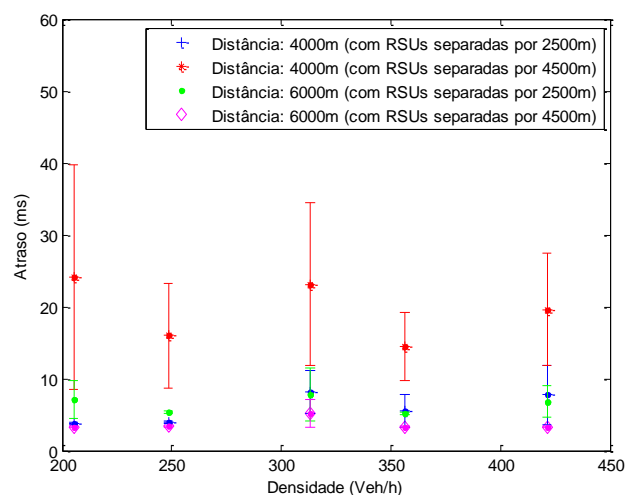


Figura 32, Atraso para cenários com RSUs ligadas por Ethernet, com 2 faixas

Ao analisar os resultados da Figura 31, nomeadamente no caso em que as RSUs se encontram separadas por 2500m, pode-se verificar que, ao contrário de outros testes, neste caso, o cenário com os veículos fonte-destino mais afastados apresenta melhores resultados, apesar de existirem mais veículos envolvidos no processo de cálculo de rotas e envio de pacotes. Os resultados para 6000m de distância entre o veículo fonte e o veículo destino são praticamente ideais, em virtude de o veículo fonte estar sempre dentro do alcance da “RSU 5” e o veículo de destino sempre dentro do alcance da “RSU 3”, conforme se pode ver na Figura 29. A explicação quer dos resultados a 6000m, quer dos resultados a 4000m reside então na posição das RSUs e sua proximidade com os veículos origem e destino.

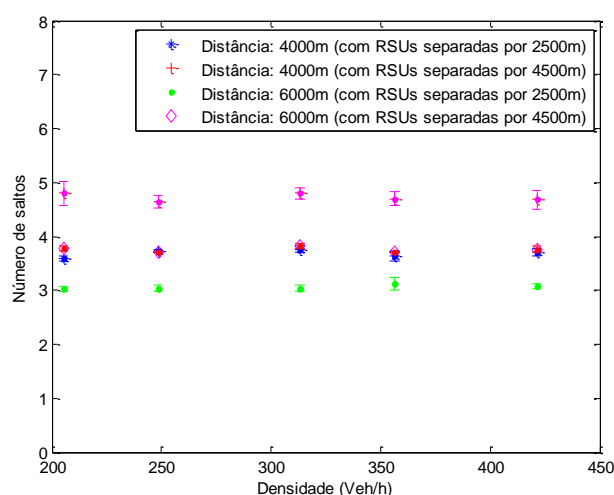


Figura 33, Número de saltos para cenários com RSUs ligadas por Ethernet, com 2 faixas

Analisando o caso em que as RSUs se encontram separadas por 4500m, com uma distância tão grande entre as RSUs, torna-se impossível ter uma cobertura total da estrada. Pelos resultados obtidos, pode-se verificar que, novamente, a situação em que os veículos fonte-destino estão separados por 6000m apresenta resultados superiores ao caso em que estão separados por 4000m.

Pelo posicionamento das RSUs e do veículo de destino, seria expectável que a entrega fosse total, no caso em que as RSUs se encontram separadas por 4500m, para uma distância fonte-destino de 6000m, uma vez que o veículo de destino se encontra sempre dentro do alcance da “RSU 2”. A justificação para isso não acontecer prende-se com o facto de o veículo fonte estar em movimento e, a partir de determinada altura deixar de ter contacto directo com a “RSU 3” (pois o alcance é de 1000m, que é aproximadamente a distância do veículo para a RSU na altura do envio do primeiro pacote). Resumindo, com o passar do tempo, devido ao facto de o veículo fonte se ir afastando, deixa de haver comunicação entre este e a “RSU 3” de forma a possibilitar a entrega de pacotes a um salto entre eles.

Os valores de PDR mais baixos representados no gráfico resultam do facto de a distância entre as RSUs já não permitir uma cobertura total da estrada o que implica que o encaminhamento seja feito entre veículos, com as respectivas perdas associadas.

Em relação ao atraso, analisando a Figura 32, no caso em que as RSUs se encontram separadas por 2500m, verifica-se, de novo, que os resultados quando a fonte e o destino se encontram separados por 6000m são muito mais constantes e de valor mais reduzido do que no caso em que estão separados por 4000m, em virtude, mais uma vez, do posicionamento dos veículos e das RSUs.

A razão de os resultados, no caso em que os veículos fonte e destino se encontram separados por 4000m, não serem constantes justifica-se, como já se referiu, pelo facto de alguns dos pacotes terem de ser encaminhados por comunicação V2V, isto é, pelos próprios veículos, o que gera atrasos superiores pois, conforme se pode ver pela Figura 29 o veículo de destino vai-se afastar do alcance da RSU3, obrigando a que os pacotes sejam encaminhados pelos próprios veículos.

Relativamente ao caso em que as RSUs se encontram separadas por 4500m, o facto de os valores de atraso, relativos a uma separação fonte-destino de 6000m, serem inferiores aos de 4000m justifica-se, também, pela conjugação da posição das RSUs e dos veículos de origem e destino. Portanto, os resultados relativos a uma separação de 6000m entre a fonte e o destino são melhores porque existe uma RSU próxima do veículo de origem (“RSU 5”) e uma próxima do veículo de destino (“RSU 5”) disponíveis para encaminhar os pacotes. A variação do atraso, comparado com os casos anteriores de RSUs ligadas (com separação entre as RSUs inferior a 2000m), resulta do facto de, a determinada altura da simulação, o veículo de origem já estar muito afastado da “RSU 5” para estabelecer um contacto directo e então tornar-se necessário fazer encaminhamento por outros veículos, aumentando dessa forma o atraso e impossibilitando que esse valor seja constante. Por sua vez, para 4000m, os valores são mais elevados na medida em que não existe nenhuma RSU próxima do destino, pelo que é necessário fazer encaminhamento pelos veículos. Desta forma, os valores de atraso, assim como os seus intervalos de confiança, aproximam-se mais dos resultados sem RSUs ou com RSUs desligadas, desvanecendo-se o efeito benéfico que resulta do facto das RSUs estarem ligadas.

A nível de número de saltos, para o caso em que as RSUs se encontram separadas por 2500m, enquanto que para os 6000m de distância entre o veículo-fonte e o veículo-destino, o número de saltos acaba por ser constante, pelos motivos que foram realçados, para os 4000m, o veículo de destino acaba por se ir afastando da “RSU 3” e, portanto, a entrega deixa de ser directa de uma das RSUs para o veículo de destino, necessitando de ser feito o encaminhamento por um dos veículos, aumentando o número de saltos para 4, em grande parte das situações.

Finalmente, no caso em que as RSUs estão separadas por 4500m, apenas os primeiros pacotes são enviados directamente do veículo fonte para a “RSU 5”. Sendo assim, na maior parte dos casos existe logo um salto antes de chegar à RSU. Isso justifica o facto de, mesmo para o caso em que as RSUs se encontram separadas por 6000m o valor não ser exactamente 3. No caso em que as RSUs se encontram separadas por 4000m o resultado já é muito mais aleatório pois a informação vai circular, muitas vezes, por veículos também.

Como comparação final destes cenários com RSUs ligadas podemos concluir que, em virtude dos testes elaborados nesta Dissertação, existe um valor de distância entre as RSUs a partir do qual deixa de haver uma estabilidade a nível de atraso que é de, aproximadamente, 1800m.

2. Ligadas por Wi-Fi

Uma outra forma de ligar as RSUs é através de ligações sem fios, como por exemplo Wi-Fi. Deste modo, definiram-se os cenários necessários e criou-se uma nova interface para comunicação entre as RSUs, com um alcance de cerca de 2500m, para o cenário com as RSUs separadas por 1200m, para que existisse, garantidamente, comunicação entre todas as RSUs. O objectivo é avaliar até que ponto é possível obter resultados semelhantes com RSUs ligadas por Ethernet e Wi-Fi, e qual a influência da tecnologia nestes cenários.

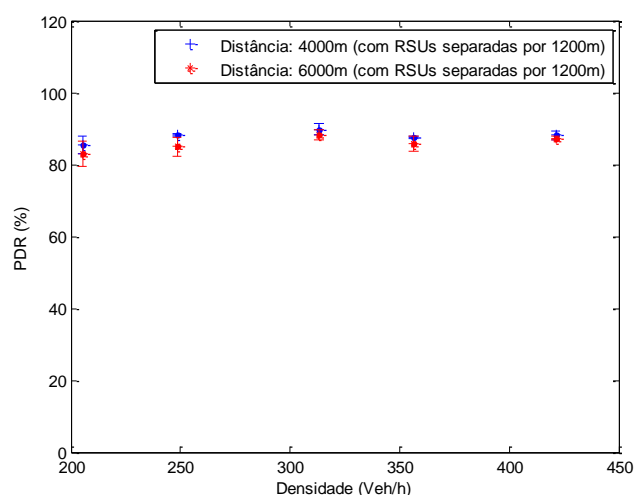


Figura 34, PDR para cenários com RSUs ligadas por Wi-Fi, com 2 faixas

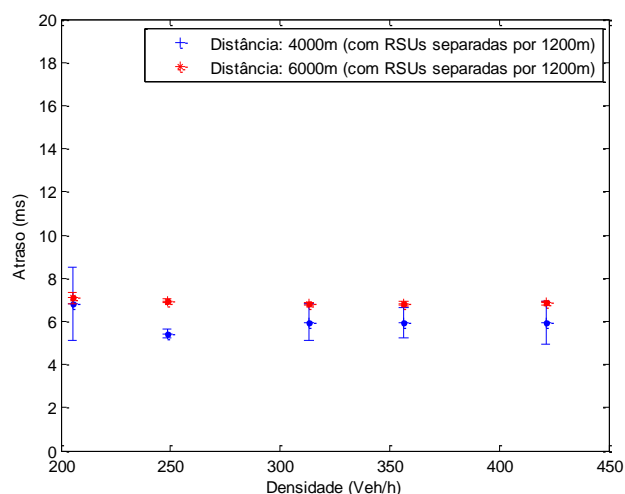


Figura 35, Atraso para cenários com RSUs ligadas por Wi-Fi, com 2 faixas

Observando os resultados da Figura 34 verifica-se que existem perdas associadas ao Wi-Fi, tais como possíveis colisões de pacotes, ou perdas resultantes do modelo de propagação utilizado, que justificam a falta de perfeição nos resultados, quando comparados com os resultados das RSUs ligadas por Ethernet. Outro aspecto que se pode observar é que, mais uma vez, a distância entre o veículo fonte e o veículo destino não tem grande influência no resultado final, no sentido em que o alcance das RSUs permite que seja coberta toda a área das faixas de rodagem.

Ao contrário do que sucede quando as RSUs são ligadas por Ethernet, neste caso, com as RSUs ligadas por Wi-Fi, mesmo com as RSUs todas dentro do alcance umas das outras, já são esperados atrasos resultantes das ligações sem fios. No entanto, não se esperam grandes alterações e o valor desse atraso deverá ser relativamente constante e reduzido.

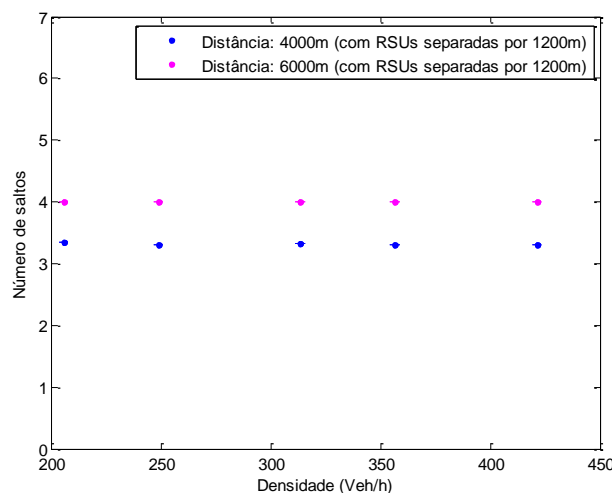


Figura 36, Número de saltos para cenários com RSUs ligadas por Wi-Fi, com 2 faixas

Depois de verificados os resultados da Figura 35 conclui-se que existem sempre atrasos associados a cenários Wi-Fi, como já foi referido. Para além disso, o modelo de perdas usado no Wi-Fi também gera atrasos que necessitam de ser contabilizados.

Analisando agora a Figura 36, verifica-se que ambos os casos apresentam valores constantes. O facto de o cenário em que a distância fonte-destino é de 6000m apresentar apenas 4 saltos, tem a ver com o alcance das RSUs ser de 2500m, o que implica que as RSUs comuniquem duas a duas. Sendo assim, o valor acaba por ser constante e ter o valor de 4. No caso em que a distância é de 4000m, o valor está entre 3 e 4 saltos pois os primeiros pacotes enviados não são entregues pela mesma RSU que os restantes, havendo a necessidade de mais um salto. Nestes primeiros casos, a partir do momento em que estabiliza, o valor é sempre 3, daí o resultado ser mais próximo de 3. Estes resultados resultam da conjugação da posição das RSUs e da posição dos veículos.

Quer para um quer para outro caso, os pacotes circulam sempre pelas RSUs, daí os valores de atraso serem mais reduzidos (como já se verificou) e o número de saltos ser mais constante.

4.5.3.3 Cenário sem RSUs com AODV

O AODV é um protocolo de encaminhamento reactivo e tem como objectivo conseguir uma melhor adaptação à mobilidade das redes veiculares, uma vez que não necessita de ter uma imagem virtual da rede construída (que, com a constante mobilidade dos veículos, se torna difícil de manter), calculando apenas as rotas no instante em que pretende enviar os pacotes.

Até aqui todos os resultados apresentados tinham o protocolo de encaminhamento OLSR aplicado. De seguida, de forma a possibilitar uma comparação com este mesmo protocolo e de forma a verificar o desempenho das comunicações com protocolos reactivos, vão-se apresentar os resultados com AODV.

Sendo assim, será de esperar uma melhor eficácia a nível de entrega de pacotes, quando comparado com os resultados do OLSR, assim como um atraso superior.

É de realçar, mais uma vez, que se limitaram estes testes a cenários sem RSUs.

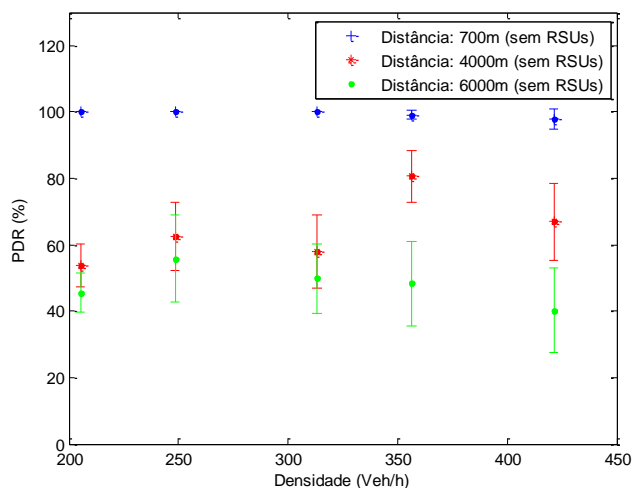


Figura 37, PDR para cenários sem RSUs, com 2 faixas (AODV)

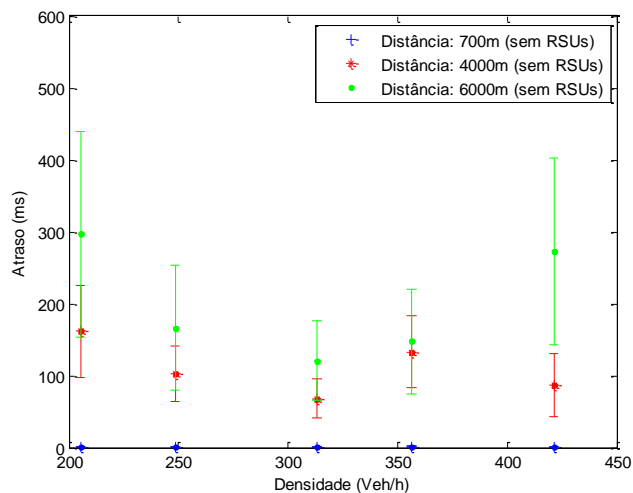


Figura 38, Atraso para cenários sem RSUs, com 2 faixas (AODV)

Analisando os resultados da Figura 37, no caso em que os veículos estabelecem uma comunicação com apenas um salto, estes são aproximadamente ideais, tal como era expectável.

Nos dois restantes casos representados nessa figura, tal como seria de esperar, houve um aumento bastante significativo no PDR, quando comparado com o caso em que se tinha o OLSR configurado, havendo no entanto uma forte variação do intervalo de confiança, que acaba por ser aceitável no sentido em que num protocolo reactivo se fazem sentir mais as diferenças de distribuição dos veículos que ocorrem em cada simulação.

Também neste caso se nota a influência da distância na entrega de pacotes pois aumentando a distância acaba por se aumentar o número de veículos que participam no estabelecimento da rota, aumentando também o *overhead* do protocolo.

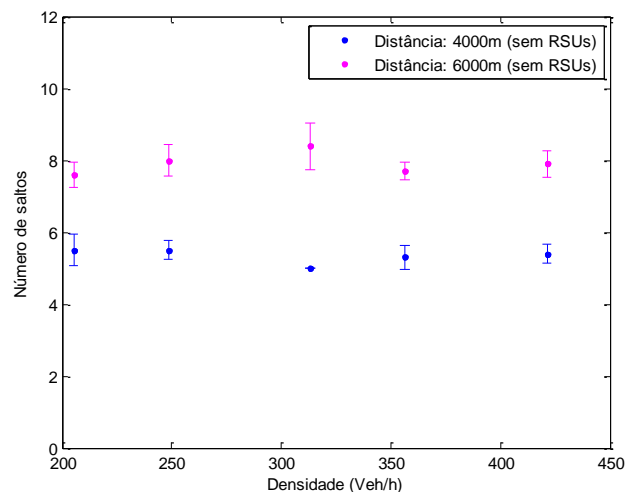


Figura 39, Número de saltos para cenários sem RSUs, com 2 faixas (AODV)

Como se pode ver na Figura 38, tal como no caso do OLSR, também para o AODV os resultados do atraso nas comunicações a um salto de distância são muito baixos, pois resultam apenas do tempo de associação. Os valores são praticamente iguais, quer para o OLSR, quer para o AODV. Nos restantes casos, os valores de atraso são bastante superiores aos do OLSR pois, como já foi referido, o AODV é um protocolo reactivo, pelo que é normal que demore mais tempo a entregar os pacotes (antes de enviar o pacote ainda necessita de calcular a rota para o destino, trocando os tais pacotes de estabelecimento e manutenção de rotas já referidos).

Em virtude dos resultados obtidos, quer no cenário de 4000m, quer no de 6000m, parece haver um valor ideal de densidade para o qual os atrasos são menores. Esse valor de densidade permite uma troca mais eficaz dos pacotes de estabelecimento de rotas, necessitando, por exemplo, menos dos veículos que circulam na faixa contrária. Outro factor relevante é que os valores de atraso para 6000m são superiores, porque as mensagens de estabelecimento de rotas percorrem muitos mais veículos até chegarem ao destino. Com o aumentar da densidade, aumenta também o atraso, pois aumenta o *overhead*.

Por sua vez, quando a densidade é mais reduzida, também se nota um aumento do atraso, porque existe uma maior necessidade de recorrer aos veículos que circulam em faixa contrária, sendo mais demorado o estabelecimento da rota. Também os intervalos de confiança são elevados pois, com o AODV, existe “*flooding*” das mensagens de estabelecimento de rotas e a distribuição dos veículos nesses casos tem uma importância maior, acabando por gerar valores mais díspares.

Como balanço final pode-se concluir que o AODV tem um atraso bastante superior ao OLSR o que, em determinadas comunicações, pode ser problemático.

Analisando os resultados da Figura 39, podemos concluir que o AODV apresenta um número de saltos superior ao OLSR. Como existe a necessidade de uma grande troca de pacotes de

estabelecimento e manutenção de rotas, sempre que se pretende enviar um pacote e a rota não exista, haverão mais nós envolvidos com consequente aumento do número de saltos.

4.6 Conclusão

Neste capítulo foram apresentados os cenários que foram elaborados ao longo desta Dissertação, de modo a analisar a influência de RSUs em diferentes cenários e com diferentes configurações.

Verificou-se que, relativamente aos cenários com infra-estruturas, particularmente no que diz respeito ao *Re-Healing Time*, este está fortemente dependente da velocidade dos veículos e da densidade dos mesmos, o que leva à formação de *clusters* com diferentes tamanhos e que influenciam o valor final. Em relação a estes resultados pode-se concluir que os mesmos são muito semelhantes aos resultados teóricos, de simulação com *store-carry-forward*, e experimentais apresentados em [79]. A variação existente relativamente a esses valores diz respeito ao tempo de convergência do protocolo de encaminhamento usado (OLSR) assim como ao modelo de propagação real utilizado (que não é utilizado nos resultados teóricos e de simulação *store-carry-forward*).

No que diz respeito aos cenários em auto-estrada, verificou-se que as comunicações só apresentavam resultados muito próximos do ideal (nas três métricas avaliadas), quando as RSUs se encontravam ligadas por Ethernet, com um espaçamento entre elas inferior a 2000m.

Conseguimos verificar também que as comunicações em que as RSUs estão ligadas por Wi-Fi levam a algumas perdas de pacotes (mesmo que ligeiras) e a um atraso ligeiramente superior, comparadas com as situações em que as RSUs estão ligadas por Ethernet. Este tipo de teste é importante devido à possibilidade de se estabelecer a ligação por LTE ou por WiMAX.

Conclui-se ainda que as RSUs desligadas não apresentam um efeito estabilizador, quando comparadas com os cenários sem RSUs, apresentando em ambos os casos resultados insatisfatórios, quer na percentagem de pacotes entregues, quer no atraso na entrega.

Por fim, confirma-se que o AODV apresenta um melhor rácio de entrega de pacotes. No entanto, devido ao facto de ser um protocolo reactivo, apresenta um atraso superior na entrega de pacotes e os resultados são mais instáveis.

5. Conclusões e trabalho futuro

5.1 Conclusões

A capacidade de uma rede veicular suportar aplicações sensíveis ao atraso, tais como aplicações de segurança, ou aplicações de entretenimento, está fortemente dependente de uma boa conectividade da rede. Nas auto-estradas, o fenómeno de redes desligadas, causado pela escassez de veículos em certas horas do dia, pode ser minimizado com o recurso à implantação de RSUs.

Os resultados obtidos permitiram ter uma noção mais aprofundada do desempenho das redes veiculares com infra-estrutura, assim como permitiram idealizar, perante os testes, qual seria o número de RSUs adequado para se atingirem os objectivos de garantir o mínimo atraso aceitável, ou garantir o máximo de entregas de pacotes possível. Isto é, permitiram avaliar a relação entre custo e distribuição das RSUs.

Uma das conclusões que se pode extrair de todo este trabalho é que a única hipótese de se conseguir obter uma comunicação de qualidade elevada entre veículos num cenário de auto-estrada é recorrendo a RSUs ligadas por Ethernet.

Os resultados anteriores demonstram que as RSUs desligadas têm um efeito desestabilizador, tornando mais instáveis as comunicações, quer nas entregas de pacotes quer essencialmente nos atrasos gerados na entrega desses mesmos pacotes. A explicação, como já foi avançada em cima, prende-se com o facto das RSUs desligadas não serem mais do que veículos parados e, dessa forma, mais facilmente uma rota que inclua essas RSUs pode acabar por ficar desactualizada em virtude de as RSUs se manterem fixas e os veículos estarem em constante movimento com velocidades bastante elevadas, pelo que essas rotas se podem perder muito facilmente, originando as tais instabilidades.

Relativamente ao binómio “melhoria na comunicação vs custo das RSUs”, mencionado como um dos objectivos de estudo desta Dissertação, pode-se concluir que, perante os testes efectuados, a solução ideal é instalar as RSUs a uma distância entre os 1800m e os 2000m. Esta é a única forma de garantir uma entrega de pacotes total e garantir um atraso constante e de valor reduzido, tornando este cenário atractivo para todo o tipo de simulações.

Outra conclusão que se pode retirar é que os cenários, para funcionarem correctamente, necessitam de ter uma densidade de veículos aceitável pois, como se pode concluir pelos resultados dos cenários com infra-estrutura, em que o alcance está limitado a 250m, os valores de *Re-Healing Time* para veículos isolados são incomportáveis, o que é perfeitamente compreensível. Por outro lado, assumindo que se usam os protocolos de encaminhamento adequados (geográficos, por exemplo) ou assumindo mesmo que não são usados protocolos de encaminhamento, quanto maior for a velocidade dos veículos, menor é o valor do *Re-Healing Time* na medida em que se fecham as lacunas muito mais rapidamente. Analisando os valores de *Re-Healing Time*, verifica-se que as RSUs ligadas permitem, mediante a densidade de veículos ou a disposição das próprias RSUs, uma comunicação com valores de *Re-Healing Time* inferiores a 5s.

Também se pode verificar, pela variação que houve no tempo de convergência da tabela de encaminhamento nos cenários testados a 50km/h e a 108 km/h que a velocidade influencia esses mesmos protocolos pelo que uma velocidade mais baixa implica uma melhoria nas comunicações.

No que diz respeito ao número de saltos, pode-se verificar que os cenários com RSUs ligadas (cuja separação é inferior a 2000m) apresentam um menor número de saltos e mantêm esse valor constante ao longo do tempo. Mais uma vez se verifica que estes cenários são os únicos que garantem qualidade e estabilidade no estabelecimento de comunicações entre os veículos. Essa estabilidade é, em grande parte, resultado do facto de, nestes cenários, não ser necessário recorrer a veículos que circulem nas faixas contrárias para estabelecer a comunicação pois esta é assegurada essencialmente pelas RSUs.

5.2 Trabalho Futuro

Como trabalho futuro, existem vários pontos que podem ser abordados num futuro muito imediato:

- Melhorar os protocolos de encaminhamento existentes. Para isso, por exemplo, no OLSR poder-se-ia influenciar a escolha do MPR alterando a sua heurística e adicionando outro contexto, para melhorar essa selecção;
- Adaptar um protocolo de encaminhamento diferente dos existentes, baseados no posicionamento dos veículos;
- Testar cenários cuja velocidade dos veículos não seja constante, com ultrapassagens, de modo a testar o comportamento dos cenários em situações ainda mais semelhantes com a realidade.
- Testar o mesmo tipo de parâmetros nas intersecções entre os veículos. Isto é, elaborar cenários em que os veículos deixem de circular paralelamente e passem a circular de forma a cruzarem-se perpendicularmente uns aos outros, com o objectivo de se evidenciarem as alterações que ocorrem nesse caso quando comparadas com, por exemplo, os resultados desta Dissertação em que os veículos circulavam paralelamente.

Bibliografia²

1. *DRIVE-IN (Distributed Routing and Infotainment through VEhicular Inter-Networking)*. [Online] [Citação: 11 de Janeiro de 2011.] <http://drive-in.cmuportugal.org/>.
2. *The ns-3 network simulator*. [Online] [Citação: 4 de Outubro de 2010.] <http://www.nsnam.org/>.
3. **Moustafa, Hassnaa e Zhang, Yan**. *Vehicular Networks Techniques, Standards and Applications*. Broken Sound Parkway NW : CRC Press, 2009.
4. *Audi Worldwide*. [Online] [Citação: 28 de Junho de 2011.] www.audi.com.
5. *BMW automobiles*. [Online] [Citação: 28 de Junho de 2011.] www.bmw.com.
6. *Chrysler*. [Online] [Citação: 28 de Junho de 2011.] www.chrysler.com.
7. *Fiat*. [Online] [Citação: 28 de Junho de 2011.] www.fiat.com.
8. *Renault*. [Online] [Citação: 28 de Junho de 2011.] www.renault.com.
9. *Volkswagen*. [Online] [Citação: 28 de Junho de 2011.] www.volkswagen.com.
10. **Alves, Rafael dos S., et al**. *Redes Veiculares: Princípios, Aplicações e Desafios*. 2009, 5, pp. 199-254.
11. Car 2 Car Communication Consortium Manifesto (Version 1.1). *Car 2 Car - Communication Consortium*. [Online] 28 de Agosto de 2007. [Citação: 12 de Fevereiro de 2011.] <http://www.car-to-car.org>.
12. *Intelligent Transport Systems | Transportation Technology*. [Online] [Citação: 12 de Junho de 2011.] <http://www.scgyjt.net/intelligent-transport-systems.html>.
13. *Realistic simulation of a broadcast protocol for an inter vehicle*. **W.Kremer**. Proc. of the 41st IEEE Vehicular Technology, St. Louis, MO : s.n., 1991.
14. *Broadcast reception rates and effects of priority access in 802.11-based vehicular ad-hoc networks*. **Torrent-Moreno, M., Jiang, D. e Hartenstein, H**. Proc. of the First ACMWorkshop on Vehicular Ad Hoc Networks, Philadelphia, PA : s.n., 2004.
15. *A survey of geocast routing protocols*. **Maihöfer, C**. 2004, Communications Surveys & Tutorials, IEEE, Vol. 6 Issue:2, pp. 32-42.
16. *The broadcast storm problem in a mobile ad hoc network*. **Ni, S., et al**. Proc. of the ACM International Conference on Mobile Computing and Networking, Seattle, WA : s.n., 1999.
17. **Tonguz, O. K. e G.Ferrari**. *Ad Hoc Wireless Networks: A Communication-Theoretic Perspective*. New York : John Wiley & Sons, 2006.
18. *On the Broadcast Storm Problem in Ad Hoc Wireless Network*. **Wisitpongphan, N., et al**. Dezembro de 2007, IEEE Wireless Communications.
19. **H. Krishnan**. Vehicle Safety Communications Project. [Online] 15 de Fevereiro de 2006. [Citação: 11 de Maio de 2011.] <http://www.sae.org/events/ads/krishnan.pdf>.
20. Collision Avoidance Metrics Partnership - CAMP (U.S.). [Online] [Citação: 8 de Abril de 2011.] <http://www.its.dot.gov/cicas>.
21. *orange.com*. [Online] [Citação: 28 de Junho de 2011.] http://www.orange.com/en_EN/.

² De acordo com o estilo ISO 690

22. *Home Page | Telecom Italia*. [Online] [Citação: 28 de Junho de 2011.] <http://www.telecomitalia.it/>.
23. *AT&T| Cell Phones, U-verse, Digital TV, DSL Internet and Phone Service*. [Online] [Citação: 28 de Junho de 2011.] www.att.com.
24. *Deutsche Telekom: Startseite*. [Online] [Citação: 28 de Junho de 2011.] www.telekom.com.
25. *Google*. [Online] [Citação: 28 de Junho de 2011.] <http://www.google.com/>.
26. *TomTom, portable GPS car navigation systems*. [Online] [Citação: 28 de Junho de 2011.] <http://www.tomtom.com/>.
27. Microsoft Helping Carmakers and Suppliers Drive Innovation. *Microsoft*. [Online] [Citação: 14 de Abril de 2011.] <http://www.microsoft.com/windowseembedded/en-us/evaluate/windows-embedded-automotive-7.aspx>.
28. *Routing protocols for vehicular Ad Hoc networks in rural areas*. **Zhang, M. e Wolff, R.** Communications Magazine, IEEE, Novembro de 2008, Vols. 46, no.11, pp. 126-131.
29. *Mobile Ad Hoc Networking Working Group – OLSR (Optimized Link State Routing Protocol)*. [Online] [Citação: 14 de Fevereiro de 2011.] <http://www.ietf.org/rfc/rfc3626.txt>.
30. Protocolo OLSR (Optimized Link State Routing). *Redes Ad Hoc - Protocolos*. [Online] [Citação: 16 de Março de 2011.] http://www.gta.ufrj.br/grad/09_1/versao-final/adhoc/olsr.html.
31. *Optimized Link State Protocol for Ad Hoc Networks*. **Jacquet, P., et al.** IEEE INMIC Pakistan, 2001.
32. *Mobile Ad Hoc Networking Working Group – AODV (Ad hoc On-demand Distance Vector)*. [Online] [Citação: 14 de Fevereiro de 2011.] <http://www.ietf.org/rfc/rfc3561.txt>.
33. Protocolo AODV (Ad Hoc On-Demand Distance Vector). *Redes Ad Hoc - Protocolos*. [Online] [Citação: 16 de Março de 2011.] http://www.gta.ufrj.br/grad/09_1/versao-final/adhoc/aodv.html.
34. AODV (Ad hoc On-demand Distance Vector). [Online] [Citação: 3 de Março de 2011.] <http://www.gta.ufrj.br/~rezende/cursos/eel879/trabalhos/aodv/caracteristicas.html>.
35. **Usop, Nor Surayati Mohamad, Abdullah, Azizol e Abidin, Ahmad Faisal Amri.** Performance Evaluation of AODV, DSDV & DSR Routing Protocol in Grid Environment.
36. *Survey of position based routing for Inter Vehicle Communication system*. **Tee, C.A.T.H. e Lee, A.C.R.** Distributed Framework and Applications, 2008. DFMA 2008. First International Conference, 21-22 de Outubro de 2008, pp. 174-182.
37. *Secure Position-Based Routing for VANETs*. **Harsch, C., Festag, A. e Papadimitratos, P.** Vehicular Technology Conference, 2007. VTC-2007 Fall. 2007 IEEE 66th, 30 de Setembro de 2007, pp. 26-30.
38. *Towards Efficient Geographic Routing in Urban Vehicular Networks*. **Jerbi, M., Senouci, S. M. e Rasheed., T.** Vehicular Technology, IEEE Transactions, 2009, Vols. 58, no.9, pp. 5048-5059.
39. *Performance Comparison of a Position-Based Routing Protocol for VANET*. **Takano, A., Okada, H. e Mase, K.** Mobile Adhoc and Sensor Systems, 2007. MASS 2007. IEEE International Conference, Outubro de 2007, pp. 1-6.

40. *MDDV: a mobility-centric data dissemination algorithm for vehicular network*. **Wu, H., et al.** Proceedings of the 1st ACM international Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks, Outubro de 2004, pp. 47-56.
41. *GPSR: greedy perimeter stateless routing for wireless networks*. **Karp, B. e Kung, H. T.** MobiCom '00. ACM, New York, NY, USA : s.n., 2000, Proceedings of the 6th Annual international Conference on Mobile Computing and Networking , pp. 243-254.
42. *A routing strategy for vehicular ad hoc networks in city environments*. **Lochert, C., et al.** Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV2003), Junho de 2003, pp. 156-161.
43. *Spatial Aware Geographic Forwarding for Mobile Ad Hoc Networks*. **Tian, J., Stepanov, I. e Rothermel, K.** Proc. MobiHoc, Lausanne, Switzerland : s.n., Junho de 2002.
44. *A Routing Strategy for Metropolis Vehicular Communications*. **Liu, B.-S. L. Genping, et al.** International Conference on Information Networking, Fevereiro de 2004, Vol. 2, pp. 533-542.
45. **Rappaport, T.** *Wireless Communications: Principles and Practice*. Upper Saddle River, NJ, EUA : Prentice Hall PTR, 2ª Edição, 2001.
46. *Centrality-based Access-Points deployment for vehicular networks*. **Kchiche, A. e Kamoun, F.** IEEE 17th International Conference on Telecommunications, 2010, pp. 700-706.
47. *Data Aggregation and Roadside Unit Placement for a VANET Traffic Information System*. **Lochert, C., et al.** Proc. of the 5th ACM International Workshop on Vehicular Internetworking (VANET 2008), New York, USA : s.n., 58-65 de September de 2008.
48. *Using RSUs as Delegates for Pervasive Access to Services in Vehicle Ad Hoc Networks*. **Mershad, K. e Artail, H.** Proc. of the 17th IEEE International Conference on Telecommunications (ICT 2010), Doha, Qatar : s.n., Abril de 2010.
49. *Optimal Placement of Gateways in Vehicular Networks*. **Li, Pan, et al.** IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2007, pp. 3421-3430.
50. *The feasibility of information dissemination in vehicular ad-hoc networks*. **Lochert, C., et al.** Proc. of Fourth Annual Conference on Wireless on Demand Network Systems and Services, January de 2007, pp. 92-99.
51. *Improving connectivity in vehicular ad-hoc networks: An analytical study*. **Yousefi, S., et al.** Computer Communications, 2008, Vol. 31, pp. 1653-1659.
52. *Probabilistic delay control and road side unit placement for vehicular ad-hoc networks with disrupted connectivity*. **Abdrabou, A. e Zhuang, W.** Journal on Selected Areas in Communications, January de 2011, Vols. 29, no.1, pp. 129-139.
53. *On a Stochastic Delay Bound for Disrupted Vehicle-to-Infrastructure Communication with Random Traffic*. **Abdrabou, A. e Zhuang, W.** IEEE Global Telecommunications Conference, 2009, pp. 1-6.
54. *Analysis of Access and Connectivity Probabilities in Infrastructure-Based Vehicular Relay Networks*. **Ng, Seh Chun, et al.** IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2010, pp. 1-6.
55. *Performance Comparison of AODV and OLSR in VANETs Urban Environments under Realistic Mobility Patterns*. **Haerri, Jerome, Filali, Fethi e Bonnet, Christian.** 5th IFIP Mediterranean Ad-Hoc Networking Workshop, Lipari, Itália : s.n., 14-17 de Junho de 2006.
56. *Performance evaluation of data disseminations for vehicular ad hoc networks in highway scenarios*. **Wei, Xiong e Qing-Quan, Li.**

57. *Performance Analysis of AODV, DSR, and Swarm Intelligence Routing Protocols In Vehicular Ad hoc Network Environment*. **Manvi, S.S., Kakkasageri, M.S. e Mahapurush, C.V.** International conference on future Computer and Communication, Abril de 2009, pp. 21-25.
58. *Improving Route Stability and Overhead on AODV Routing Protocol and Make it Usable for VANET*. **Abedi, O., Berangi, R. e Azgomi, M. A.** Distributed Computing Systems Workshops, 2009. ICDCS Workshops '09, 22-26 de June de 2009, 29th IEEE International Conference, pp. 464-467.
59. *Enhancing AODV routing protocol using mobility parameters in VANET*. **Abedi, O., Fathy, M. e Taghiloo, J.** Computer Systems and Applications, 2008. AICCSA 2008, 2008, IEEE/ACS International Conference, pp. 229-235.
60. *Scenario based Performance Analysis of AODV e OLSR in Mobile Ad hoc Networks*. **S.Gowrishankar, et al.** Proceedings of the 24th South East Asia Regional Computer Conference, Bangkok, Thailand : s.n., 2007.
61. **Naga.V.Yedida, Rajesh Reddy Challa.** Performance Comparison of AODV, DSR and OLSR Routing Protocols in Static Scenarios.
62. **Glaropoulos, Ioannis, Makris, Athanasios e Tighnavard, babak.** Performance Analysis of OLSR and Comparison with OSPF and AODV.
63. *Ad hoc Wireless Multicast with Mobility Prediction*. **S.Lee, Su, W. e Gerla, M.** 1999, IEEE ICCCN'99Boston, MA, pp. 4-9.
64. *Motion Prediction in Mobile/Wireless Networks*. **W.Su.** Los Angeles, CA : s.n., 1999, PhD Dissertation, UCLA Computer Science Department.
65. *GloMoSim:A Scalable Network Simulation Environment*. **Bajaj, Lokesh, et al.** Los Angeles, CA : s.n., 1999, Technical report 990027, UCLA Computer Science Department.
66. *Simulation based Analysis of Adhoc Routing Protocol in Urban and Highway Scenario of VANET*. **Singh, Pranav Kumar, Lego, Kapang e Tuithung, Dr.Themrichon.** Janeiro de 2011, International Journal of Computer Applications, Vols. 12 - No.10.
67. *A Review of Current Routing Protocols for Ad Hoc Wireless Networks*. **Royer, E. e Toh, C.-K.** Abril de 1999, IEEE Pers. Commun, pp. 46-55.
68. *A Performance Comparison of Multi-hop Wireless Ad Hoc Network Routing Protocols*. **Broch, Josh, et al.** Proc. 4th ACM/IEEE Int'l. Conf. Mobile Computing and Networking MOBICOM '98, Dallas, TX, USA : s.n., 1998, pp. 85-97.
69. *The Network Simulator - ns-2*. [Online] [Citação: 11 de Junho de 2011.] <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
70. *Highway Mobility And Vehicular Networks In Ns3. ns-3-highway-mobility*. [Online] [Citação: 4 de Janeiro de 2011.] <http://code.google.com/p/ns-3-highway-mobility/wiki/HighwayMobilityAndVehicularNetworksInNs3>.
71. *Old Dominion University*. [Online] [Citação: 12 de Junho de 2011.] <http://www.odu.edu>.
72. *Highway Mobility And Vehicular Ad-hoc Networks in ns-3*. **Arbabi, Hadi e Weigle, Michele C.** 2010. Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference.
73. *Longitudinal Traffic model: The IDM*. [Online] [Citação: 10 de Dezembro de 2010.] <http://www.vwi.tu-dresden.de/~treiber/MicroApplet/IDM.html>.

74. *The Lane-change Model MOBIL*. [Online] [Citação: 10 de Dezembro de 2010.] <http://traffic-simulation.de/MOBIL.html>.
75. *Transportation Human Factors*. **Marc Green**. "How Long Does It Take to Stop?" Methodological Analysis of Driver Perception-Brake Times, 2000, Vol. 2, pp. 195-216.
76. Conceptual Overview - ns-3 vns-3-dev documentation. *ns-3*. [Online] [Citação: 3 de Outubro de 2010.] <http://www.nsnam.org/docs/tutorial/html/conceptual-overview.html#a-first-ns-3-script>.
77. *Routing in Sparse Vehicular Ad Hoc Wireless Networks*. **Wisitpongphan, Nawaporn, et al.** Outubro de 2007, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 25 Issue:8 , pp. 1538 - 1556.
78. Random Variables - ns-3 vns-3.10 documentation. *ns-3*. [Online] [Citação: 19 de Maio de 2011.] <http://www.nsnam.org/docs/release/3.10/manual/html/random-variables.html#seeding-and-independent-replications>.
79. *Infrastructure Support in Sparse Vehicular Ad Hoc Networks*. **Reis, Andre B., et al.** Pittsburgh, PA, USA : s.n., 2011.
80. *Enhancing AODV Routing Protocol Using Mobility Parameters in VANET*. **Abedi, Omid, Fathy, Mahmood e Taghiloo, Jamshid**. AICCSA 2008. IEEE/ACS International Conference on Computer Systems and Applications 2008 , 2008.
81. Central Limit Theorem. [Online] [Citação: 3 de Junho de 2011.] http://www.statisticalengineering.com/central_limit_theorem.htm.